

1,540,000nm

154 万

ナノメートル

色素増感太陽電池

Appropriate

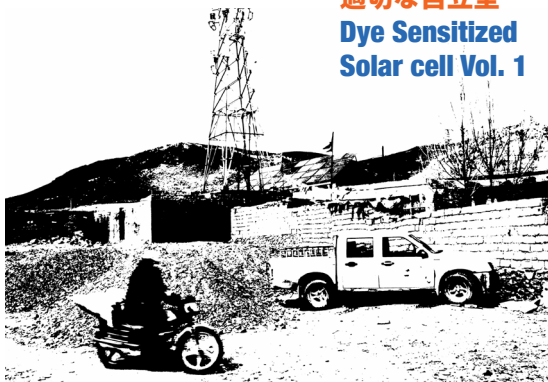
Off-Grid

Solar RAVE

適切な自立型

Dye Sensitized

Solar cell Vol. 1



4	介紹	4	紹介	4	Introduction
7	一個溫室的故事	7	ある温室の物語	7	A Greenhouse Story
14	從被綁架的陽光到第三代太陽能	14	囚われた太陽光から第三世代太陽電池へ	14	From Kidnapped Sunlight to 3rd-Generation Solar Energy
18	DIY DSSC	18	DIY 色素増感電池	18	DIY dye sensitized solar cell
18	從明治開始	18	明治から始める	18	Starting with the Sandwich
31	DSSC 模組	31	DSSC モジュール	32	Dye Sensitized Solar Cell Modules (DSMs)
34	電壓電流特性曲線	34	電圧電流特性曲線	35	Voltage-Current Characteristic curve
38	透明的 DSSC !	38	透明な DSSC !	38	Transparent DSSC!
38	為什麼是透明的	38	なぜ透明なのか？	38	Why Transparent?
41	光伏農業	41	アグリボルタイク	41	Agrivoltaics
44	成本和能源回收期	43	コストとエネルギー回収期間	45	Cost and Energy Payback Time
44	每平方公分 0.13 美元	44	1 平方センチメートルあたり 0.13 ドル	45	\$0.13 Per Square Centimeter
45	EPBT	45	EPBT (エネルギー回収期間)	45	Energy Payback Time (EPBT)

48	天然染色工藝與光伏技術的交叉	48	天然染色技術と光伏技術の交差点	48	The Intersection of Natural Dyeing and Photovoltaic Technology
48	經典的天然染料	48	クラシックな天然染料	49	Classic Natural Dyes
50	褪色	50	色あせ	51	The Bleaching
52	共染與共敏作用	51	共染と共感作用	52	Copigmentation and Cosensitization
54	令我印象深刻的染料	54	印象的な染料	54	Impressive Dyes!
64	另類 DSSC	63	代替的な DSSC	64	Alternative DSSCs
64	一個低成本和可降解的 DSSC	64	低コストで分解可能な DSSC	64	A Low-Cost and Biodegradable Materials DSSC
67	一段由 AI 演奏的爵士鼓	66	AI が演奏するジャズドラムの一節	67	A Section of Jazz Drums Performed with AI
70	從雷射染料計劃到彩色透明太陽能玻璃	69	レーザー染色計画からカラフルで透明な太陽電池ガラスへ	69	From Laser Dye Projects to Colored Transparent Solar Glass
71	被紋身的太陽能：能源追蹤與區塊鏈技術	71	刺青された太陽エネルギー：エネルギー追跡とブロックチェーン技術	71	Tattooed Solar Energy: Energy Tracking and Blockchain Technology

目前半導體的最佳制程被稱為2奈米製程，這是最先進的技術。這是一個抽象的技術術語；早期的90奈米或130奈米製程是指晶體管的最小閘極長度（gate length），但隨著技術演進，這些數字已經不再直接對應於實際材料物理尺寸，而是反映一系列技術特性。

本計劃的名字靈感來自於2025年於FabCafe Tokyo的展覽。因為展覽中的藝術裝置是利用網版印刷在導電玻璃上印刷多個染料敏化太陽能電池（DSSC）製作的，而每個電池彼此間的最佳印刷距離約為1.54mm，也就是1,540,000nm，因此1,540,000nm不只是一個幽默的計劃名稱，也反映了一種DIY精神。

該展覽以「離網」為發想概念，介紹了我自己嘗試製作DSSC的過程以及手工上的細節紀錄，也

In today's semiconductor industry, the most advanced manufacturing process is referred to as the "2-nanometer process"—an abstract technical term. Earlier nodes such as 90 nm or 130 nm once referred to the physical gate length of a transistor, but with technological advancements, these numbers no longer correspond directly to actual material dimensions. Instead, they now reflect a set of performance-related characteristics.

The name of this project, "1,540,000nm," was inspired by an exhibition at FabCafe Tokyo in 2025. The installation consists of multiple dye-sensitized solar cells (DSSCs) screen-printed onto conductive glass. The optimal spacing between each sub-cell is approximately 1.54 mm, or 1,540,000 nanometers. As such, "1,540,000nm" is not only a humorous title—it also embodies the spirit of DIY experimentation. Rooted in the concept of being "off-grid," this exhibition documents my personal journey of attempting to fabricate DSSCs, including the detailed

介紹了圍繞在DSSC的手作過程，也探索了生態景觀和藝術工具的發想，這些發想涉及美學、能源分配議題與DIY文化之間的連結。

DSSC 是一個 2012 年左右因為封裝技術和壽命問題便淡出商業市場的「舊」技術，那為什麼我還那麼喜歡這項技術呢？我的作品常圍繞光敏材料和光線展開，並且是透過 DIY 途徑。像是我的一個舊計劃雷射射影計劃（Laser Dye Project）① 使用自製的雷射投影機在織品上顯影藍曬（Cyanotype）和凡戴克棕（Vandyke Brown）作品，也是一個從較現代的光學面向來重新發明傳統工藝。DSSC 對我來說同樣迷人，因為它是一個與染色工藝高度相關的另類工藝，能藉由染色技術和網印技術來製作並可被高度藝術化的光伏技術，也提供了學習半導體初級知識很好的動力。因此，我的起點其實是藝術與設計，能源方面的議題反而是最後接觸的。

本書強調的「DIY」和「離網」在供應鏈意義上距離真正的「民主」仍

有一段距離，例如，FTO 導電ガラスや高性能の試薬は、結局のところ既存のサプライヤーから購入しなければなりません。とはいえ、理論上は制御された環境がなくても、商業レベルに近しい変換効率を持つ DSSC を製作することは可能ですが、その生産規模では商業的競争には太刀打ちできません。DIY やメイカー文化は、商業的競争においては限界があることがすでに明らかかもしれません。しかし、知識の面では、DSSC を自作する過程で学んだことから、知識の概念こそが技術的な障壁を築いている本質であると感じられました。継続的なオープンソースこそが、資本主義的な技術文化と対抗しうる、よりふさわしい戦略なのではないかと考えています。

DIY と Maker 文化也許已被證明不足與商業競爭。但在知識層面上，在學習自製 DSSC 的過程中我發現知識和觀念才是技術壘壘豎立的關鍵，持續不斷的開源也許才是更適合與資本文化競爭的方式。

適當技術 (Appropriate Technology) は理解し難い点一個不錯的起點，主張技術應該小型化、低成本、可持續，並能由使用者社群掌控與維護。從甘地的腳踏紡織機到近代的自製者運動與開源運動，例如生態磚、微型機器人農場、紅茶菌織品、黏土 3D 列印、生物塑膠等過去十年的計劃都展示了技術如何融入自然資源、文化與環境的思考，為資源匱乏的地區提供了進一步的解決方案。

fabricate DSSCs with near-commercial efficiency even in uncontrolled environments, but the scale of production cannot compete with industrial manufacturing. DIY and maker culture may not be commercially competitive. However, through the process of learning to make DSSCs, I've realized that knowledge and conceptual access—not machinery—are the real barriers to technology. Continued open-sourcing, rather than competition, may be a more meaningful way to engage with the dominant culture of technology and capital. The concept of "Appropriate Technology" offers a useful starting point for understanding technologies that are small-scale, low-cost, sustainable, and manageable by the user community itself. From Gandhi's foot-powered spinning wheel to more recent maker and open-source movements—such as co-bricks, micro robotic farms, kombucha textiles, clay 3D printing, and bioplastics—many projects over the past decade have shown how technology can be integrated with natural resources, local culture, and environmental consciousness to offer practical solutions for resource-constrained regions. However, despite the

然而，無論去中心化的文化已經廣泛流行在當代設計中，AI、區塊鏈等技術終究仍受到精英階級和資本的統治，技術文化 (techno culture) 加劇階級的形勢似乎更是一種固有現象，這挑戰了我們對技術民主化的期待。我想這本書只是忠實的紀錄並分享我所看到的景觀和提出一些藝術表現上的有趣想法。希望能對我所接觸過的科技藝術 DIY、開源社群有些貢獻。

2018 年，我參與了位於青海囊謙地區的一項溫室建設計劃②，協助建造一個溫室原型。這段經驗啟發了我後來探索以植物材料為基礎的 DSSC，結合溫室結構，共同創造一種兼具能源生產與空間應用的共生設計。該計劃旨在為當地的一所慈善學校提供一年四季的蔬菜供應，減少依賴昂貴的來自

本書は、私自身が見てきた風景を忠実に記録し、いくつかの芸術的な発想を共有するためにすぎません。私が関わってきたテクノロジーアート、DIY、オープンソースのコミュニティに、ほんの少しでも何か貢献できればと思っています。

2018 年、私は青海省囊謙地区で行われた温室建設プロジェクトに参加し②、温室のプロトタイプを建設する手伝いをしました。この経験は、

In 2018, I participated in a greenhouse construction project in Nangqen, Qinghai ②, assisting in the creation of a greenhouse prototype. This experience inspired me to later explore DSSCs based on plant materials, integrating greenhouse structures to develop a symbiotic design that combines energy production with spatial applications. The project aimed to provide year-round vegetable supplies for a local charitable school, reducing reliance on costly imported vegetables

中國的進口蔬菜，同時探索一個結合當地資源、藝術與科學的跨領域生產系統。我們的設計試圖整合多種技術，包括地熱電池（earth battery）、半地下設計，以打造適應高原惡劣氣候的溫室。

這是一個令我難忘的經驗，因為11月的青海高原就像是科幻片場景一樣的壯觀，我曾駕駛著沒有雪鏈的汽車在茫茫茫茫的雪路上從機場開往社區。在大家都準備撤退到寧夏避冬的時候挨家挨戶的拜托鋁門窗師父留下來趕工，在雪地裡開著車找沒有閒置的挖土機師父到社區挖地，最後在大雪裡的一台挖土機裡找到了兩個睡著的當地人願意為我們工作。還有到當地的白鐵工廠拜托工人做我畫的3D設計，通常他們只做冬天裡存儲生羌牛肉的鐵櫃，最後再將整個溫室框架綁在小卡車上運到社區。到最後和全社區的一起合力完成這個溫室，成為永久的美好回憶。

但溫室建設初步完成後，由於語言不通和遠距離溝通困難的關係，有許多交接上的困難也無法

from other parts of China. At the same time, it sought to explore a interdisciplinary production system integrating local resources, art, and science. Our design attempted to incorporate multiple technologies, including earth batteries and semi-underground structures, to create a greenhouse suited to the harsh climate of the plateau. This was an unforgettable experience for me. In November, the Qinghai Plateau was as spectacular as a science fiction movie set. I drove a car without snow chains along snowy roads from the airport to the community. While most people were retreating to Ningxia to escape the winter, I went door to door persuading aluminum window and door craftsmen to stay and continue working. I searched in the snow for idle excavator operators willing to dig in the community and eventually found two local workers sleeping inside an excavator, who they typically only made iron cabinets for storing beef in winter. Finally, the entire greenhouse framework was tied to a small truck and transported to the community. In the end, building the greenhouse together with the entire community became a permanent and cherished memory. However, after the initial

掌握溫室的現況。在設計上我推測地熱管道長度不足，無法有效加熱室內空氣，僅一台風扇導致空氣循環不良，造成室內二氧化碳積聚，甚至引發當地居民不適。此外，由於設計時未考慮溫室內的動線，植物層架等結構也沒有完善設計，導致當地居民後來直接在溫室內的地面上種植植物，降低了溫室的空間利用效率，最後導致荒廢。隨著學校資源需求重點轉向其他資源，跟據校長的口述，現在他們需要圖書館建設和醫療儲存室，這個溫室計劃在我離開後便不了了之。

此外，我還注意到一個政治層面的問題。與一些曾在當地長居七年的台灣人類學者聊天後，我了解到當地所謂的「大」有效活用ができず、やがては使われなくなってしまう。その後、学校のリンクスの優先順位が他の分野に移ったこともあり、校長の話によれば、現在必要とされているのは図書館の建設や医療品の保管室であり、この温室プロジェクトは私が離れた後、そのまま立ち消えとなっていました。さらに、政治的な側面にも気づきました。現地に7年以上住んでいた台湾の人類学者と話した際、「Culture」 might be part of the



與 倉 薩 貴 葛 家 人 和 Wiriya倉薩貴葛の家族と Wiriya Rattanasuwan Collaborated with Tsangsar Kunga's family Rattanasuwan 合力建立在玉樹縣的と協力して、玉樹県に最初の温室プロトタイプと Wiriya Rattanasuwan to establish the first greenhouse prototype in Yushu County.



青海省玉樹縣 2018 年 3 月。

青海省玉樹縣 3 月 2018 年

Yushu County, Qinghai Province, March, 2018



青海省ザグセン小学校のそばにある solar panel, a washing machine, and laundry awaiting washing. 照片は 2018 年 3 月に撮影されたもの。 Photograph taken in March 2018.



温室の建設過程。写真の 6 枚の有機太陽電池パネルは、当時台湾の孟心飛教授によって支援されました。 The process of building the greenhouse. The six organic solar panels in the picture were sponsored at the time by Professor Meng Xinfei from Taiwan.

們的設計在物理與技術層面之外，對環境與文化層面的考量是多麼不足。

說到另一個我很喜歡這個故事，一位來自加拿大新斯科舍省的發明家 George Cove，於 1905 年開發出了第一個實用的太陽能發電裝置，並於 1909 年在紐約成立了 Sun Electric Generator Corporation，試圖推廣他的太陽能技術並實現商業化。他也是一個爭議性人物，據說當年 10 月他在紐約遭遇了一起綁架事件。據說，綁匪要求他放棄太陽能專利並關閉公司，但 Cove 拒絕妥協，最終被釋放在布朗克斯動物園附近，此後他的公司運營迅速崩潰。許多觀察者認為，由於太陽能固有的民主特質和離網技術，這可能是石油集團想要阻止太陽能技術的進一步發展，或是對愛迪生的電網商業模式造成了威脅，這

Chinese government's Sinicization efforts. Traditionally, the Tibetan diet does not primarily rely on vegetables or salads, as they have their own methods of fiber intake. The cultivation of greenhouses and the fostering of vegetable demand may have been intended to strengthen ties between the local population and Han Chinese society. While I have yet to conduct in-depth fieldwork to verify this perspective, it has made me realize how much our design lacked consideration for environmental and cultural dimensions beyond physical and technical aspects. One of my favorite stories involves George Cove, an inventor from Nova Scotia, Canada. In 1905, he developed the first practical solar power generation device. By 1909, he had established the Sun Electric Generator Corporation in New York, aiming to promote and commercialize his solar technology. However, Cove was a controversial figure. It is said that in October of that year, he was kidnapped in New York. Allegedly, the kidnappers demanded that he abandon his solar patents and shut

1,540,000nm of DSSC

Appropriate Off-Grid Solar RAVE

導致了接下來四十年的太陽能空窗。還有人說真正的第一個太陽能版的發明者另有其人，但這些爭議不在本書想要涉及的範圍內。

這個故事另一個有趣的部份是，與其說 George Cove 發明了太陽能，不如說他是無意間發現了太陽能，因為 Cove 和當時的科學界對半導體運作原理並無深入理解。同樣在 1905 年，愛因斯坦才剛提出了光電效應的理論，為光與物質相互作用的 research 奠定了基礎。然而，半導體能隙的概念直到 1930 年代，量子力學發展後才被明確提出——電子被認為在原子核周圍的不同能級上運行，形成所謂的「能帶」。這些能帶之間存在「能隙」，即電子無法存在的能級區域。

George Cove 的發明可能無意間形成了肖特基結構 (Schottky Junction)，一種金屬與半導體界面產生的電勢能障 (potential barrier)，可有效分離光照下生成的電子和空穴，從而實現光伏效應並產生電流。歷史

down his company. Cove refused to compromise and was eventually released near the Bronx Zoo. Soon after, his company collapsed. Many observers speculate that due to the inherently democratic and off-grid nature of solar energy, this could have been an attempt by oil conglomerates to hinder the advancement of solar technology. Others believe it posed a threat to Edison's centralized electrical grid business model, leading to a subsequent 40-year gap in solar development. Some claim that the true inventor of the first solar panel was someone else, but such debates fall outside the scope of this book. Another fascinating aspect of this story is that George Cove may not have so much "invented" solar energy as he accidentally discovered it. At the time, Cove and the scientific community lacked a deep understanding of semiconductor operation. In the same year, 1905, Einstein had just proposed his theory of the photoelectric effect, laying the groundwork for the study of light-matter interactions. The concept of semiconductor band gaps would not be clearly articulated until the 1930s, following developments in quantum mechanics. Band Gaps describe the discrete energy levels around an atomic nucleus where electrons orbit, forming what are known as "energy bands."

從被綁架的陽光到第三代太陽能電池

From Kidnapped Sunlight to 3rd-Generation Solar Energy

學家 Philip Pesavento 推測，Cove 使用銻銻合金 (ZnSb) 作為半導體材料，搭配銀和銅作為電極，意外地構造出肖特基結，使裝置能在陽光下產生電壓。雖然當時 Cove 並不理解其物理機制，但他意識到陽光可以直接轉化為電能，開啟了早期太陽能發電的探索。

這些實驗為後來的半導體物理和光伏技術發展奠定了基礎，最終促成了 1954 年貝爾實驗室的科學家們發明第一個實用矽基太陽能電池，被視為第一代太陽能技術，直到今日仍是市場上最常見的太陽能技術。1970 年代開始發展的第二代太陽能技術引入了薄膜技術，這些技術通過減少半導體層的厚度，顯著降低了材料和製造成本。薄膜技術的效率通常低於第一代 (約 10%-20%)，但總之這兩代太陽能皆受限於單一的能隙吸收範圍。

為克服單一能隙的局限，第三代太陽能技術於 1990 年代開始探索，致力於吸收並利用整個太陽光譜的光子能量。這一代技術主要包括 DSSC

Between these bands exist "gaps"—energy ranges where electrons cannot exist.

Cove's invention may have unintentionally created a Schottky junction—a potential barrier at the interface between a metal and a semiconductor. This structure effectively separates electrons and holes generated under sunlight, enabling the photovoltaic effect to produce current.

Historian Philip Pesavento speculates that Cove used zinc-antimony alloy (ZnSb) as the semiconductor material, paired with silver and copper electrodes, inadvertently forming a Schottky junction. This allowed the device to generate voltage under sunlight. Although Cove didn't understand the physical mechanisms at the time, he realized sunlight could be

directly converted into electricity, sparking early explorations in solar power generation. These experiments laid the foundation for subsequent developments in semiconductor physics and photovoltaic technology. In 1954, scientists at Bell Labs invented the first practical silicon-based solar cell, considered the first generation of solar technology.

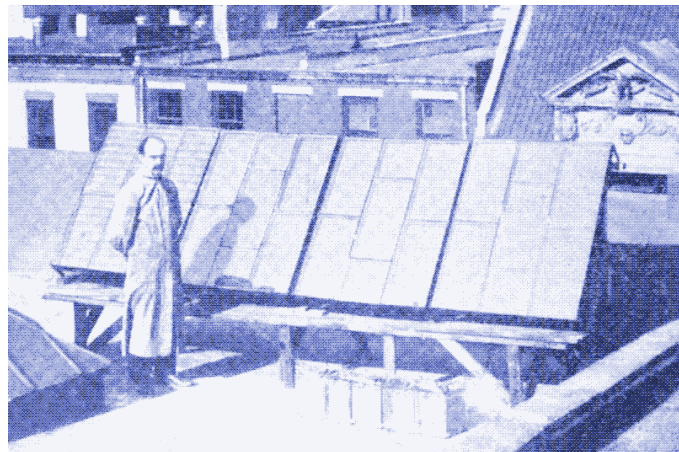
This technology remains the most common type of solar technology on the market today.

In the 1970s, second-generation solar technology emerged with the introduction of thin-film technology. By

有機太陽能電池以及鈣鈦礦太陽能電池等。直到 1991 年由瑞士科學家 Michael Grätzel 模仿植物光合作用發明了第三代太陽能技術的先驅 DSSC。1970 年代登場的第二世代太陽能技術效率 (約 10%-20%)，但兩代皆受限於單一的能隙吸收範圍。

從三明治開始

接下來我們可以進入本書的主題：怎麼製造實用的 DSSC？由於如何製造最傳統意義上的 DSSC 的方法已經可以在線上找到許多既有文獻，像是 Martineau, David 的教學



George Cove 和他發明的太陽能板。圖片來源：Low Tech Magazine。George Cove and his solar panel invention. Image Source: Low Tech Magazine.

③、和我在 Hackaday 上。

發表的製作大型版本的教學④。因此本章節會專注在我自己 DIY 工序上的經驗細節。

DSSC 的突破在於引入了多孔半導體層，染料在其中負責吸收光線並進行電荷分離，從而將光子轉化為電子。這些染料被固定在多孔半導體上，並僅用於收集自由電子並將其作為電流輸送到電極。DSSC 的競爭力源於以下幾點：(i) 簡單的製備方法有助於以可持續的方式轉化太陽能；(ii) 無毒材料的製造；以及 (iii) 設計靈活性，這三點使 DIY 製造具有實用性的太陽能技術成為可能。

容我插播一下能隙的簡單介紹——導體（如銅）沒有顯著的能隙，價帶與導帶重疊，電子能自由移動，因此具有良好的導電性。絕緣體（如木材、玻璃）則具有寬能隙，價

Technologies in this category

include DSSCs, organic solar cells, and perovskite solar cells. In 1991, Swiss scientist Michael Grätzel pioneered third-generation solar technology with the invention of DSSCs, inspired by the process of photosynthesis in plants.

Starting With The Sandwich

Now, we delve into the main topic of this book: how to make a practical DSSC? Since many resources detailing the traditional methods of making DSSCs are already available online—such as Martineau, David's tutorials ⑤ and my guide for making large-scale versions on Hackaday ④—this chapter will focus on the detailed experience gained during my DIY process.

The breakthrough of DSSCs lies in the introduction of a porous semiconductor layer. Dyes embedded within this layer absorb light and facilitate charge separation, converting photons into electrons. These dyes are fixed to the porous semiconductor, serving only to collect free electrons and transport them as current to the electrodes. DSSCs

DIY
染料敏化太陽能

DIY
色素增感太陽電池

DIY
Dye Sensitized Solar
Cell

電子需要吸收極高的能量才能躍遷至導帶，因此通常不導電。半導體的能隙介於導體和絕緣體之間，屬於較窄範圍，這使其在特定條件下可以改變性質。例如，當半導體吸收的外部能量（如光子）超過其能隙時，價帶的電子會被激發至導帶，形成自由電子和電洞，從而產生電流。這一原理正是太陽能板的工作基礎：「半導體材料吸收具有足夠能量的光子後，將光能轉換為電能」（能隙是一個複雜且高深的理論，要將其精美將其解釋清楚超過本書所能討論的範圍）。

在 DSSC 的原理圖中，可以看作一個三層結構，類似於三明治——由兩片以 FTO（氟摻雜氧化錫）玻璃為基底的透明電極夾著液態電解液構成。在這一系統中，當光子的能量 h 大於或等於染料的能隙時，電子可以被激發到 LUMO，進而而在光伏效應中產生自由電子，用於電流的生成。在這個過程中，染料敏化太陽能電池的設計與 p-n 半導體結構在功能上有一些對應：

DSSC 的直觀的優點是 offer three major advantages: (i) 多孔質半導體層を導入した simple fabrication methods that 定 in sustainable solar energy conversion, (ii) the use of non-toxic materials, and (iii) design flexibility, making them a viable option for DIY solar technology. Allow me briefly introduce the concept of the band gap. Conductors (such as copper) have no significant band gap; the valence band and conduction band overlap, allowing electrons to move freely, which results in high conductivity. Insulators (such as wood or glass), on the other hand, have a wide band gap. Electrons in the valence band require very high energy to transition to the conduction band, which is why insulators typically do not conduct electricity. The band gap of semiconductors lies between that of conductors and insulators, belonging to a relatively narrow range. This properly allows semiconductors to change their characteristics under specific conditions. For example, when a semiconductor absorbs external energy (such as photons) that exceeds its band gap, electrons in the valence band are excited to the conduction band, creating free electrons and holes, which generate an electric current. This principle forms the foundation of how solar panels work: "Semiconductor materials absorb photons with sufficient energy and convert light energy

染料 (D) 對應於光

伏材料的
統 p-n 半導體中，由半導
體材料的能隙決定光吸收
範圍，而在 DSSC 中則
由染料分子的 HOMO 和
LUMO 決定。

多孔二氧化鈦

(TiO₂) 對應於 n 型半導

體：它作為電子的傳輸層
將激發態染料中釋放的電
子高效傳輸到 FTO 電極。

電解液對應於 p 型半

導體的功能：在 DSSC 中，
電解液負責將染料氧化後
的電子還原，完成電荷再
生的過程，相當於傳統 p
型半導體 中的電洞傳輸
功能。

這種分工使得 DSSC
能以簡單的分子系統模仿
傳統光伏器件的 p-n 結
構，實現高效的光電轉換
過程。這一設計不僅簡化
了製造工藝，還拓展了染
料敏化電池在形狀、顏色
和材料選擇上的靈活性，
進一步提升其應用潛力。

光電極

Photo-electrode

1. 我使用 FTO 玻
璃做為 DSSC 的基底，

電流を生じます。この原理
が太陽電池の動作の基本であ
り、「半導体材料が十分なエ
ネルギーを持つ光子を吸収し
て光エネルギーを電気エネル
ギーに変換する」仕組みです
(バンドギャップは複雑で、こ
れを完全に説明するには本書の範囲を
超えます)。

DSSC の構造を図示するに
似て、三層構造で三明治に似
ています。透明電極として FTO
(フッ素ドープ酸化スズ) を
ガラスを基板に用い、液体電解
質を挟む形で構成されています。
このシステムでは、光子
のエネルギー h が染料のバンド
ギャップ以上の場合、電子
が LUMO に励起され、光起電
効果を通じて自由電子が生成
され電流を発生させます。こ
のプロセスにおいて、DSSC
の設計は従来の p-n 半導体構
造の機能といくつか対応して
います：

色素 (D)：は、太陽電池材料の光吸収層に相当します。従来の p-n 型半導体では、半導体材料のバンドギャップが光吸収範囲を決定しますが、DSSC では色素分子の HOMO および LUMO によって決まります。

Porous Titanium Dioxide (TiO₂)：Acts as an n-type semiconductor, serving as the electron transport layer to efficiently transfer electrons from the excited dye to the FTO electrode.

多孔質二酸化チタン (TiO₂) は n 型半導体に相当します。これは電子の輸送層として機能し、励起状態の色素から放出された電子を効率

into electrical energy." (Note: The concept of the band gap is a complex and advanced theory, and a detailed explanation exceeds the scope of this book.) In the schematic diagram of a DSSC, it can be viewed as a three-layer structure, akin to a sandwich—two transparent electrodes made of FTO (fluorine-doped tin oxide) glass sandwiching a liquid electrolyte.

In this system, when the photon energy hhh exceeds or equals the dye's bandgap, electrons can be excited to the LUMO, leading to the generation of free electrons via the photovoltaic effect. During this process, DSSC design functionally mirrors the p-n junction structure in traditional semiconductors:

Dyes (D): Correspond to the light-absorbing layer in photovoltaic materials. In traditional p-n semiconductors, the bandgap determines the range of light absorption, while in DSSCs, this is determined by the HOMO and LUMO of the dye molecules.

Porous Titanium Dioxide (TiO₂): Acts as an n-type semiconductor, serving as the electron transport layer to efficiently transfer electrons from the excited dye to the FTO electrode.

Electrolyte: Functions similarly to a p-type semiconductor. In DSSCs, electrolytes regenerate

FTO 的全名是 Fluorine 的に FTO 電極へ輸送します。electrons oxidized from the dye, completing the charge regeneration process, akin to the hole transport function in p-type semiconductors. This division of labor enables DSSCs to mimic the p-n structure of conventional photovoltaic devices using a simple molecular system, achieving efficient photoelectric conversion. This design not only simplifies the manufacturing process but also expands the flexibility of dye-sensitized cells in terms of shape, color, and manufacturing process, further enhancing their application potential.

FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) 玻璃的製作方式多樣，品質也有所不同，包括化學氣相沉積 (CVD, Chemical Vapor Deposition)、氟化法製程 (FFG, Fluorine Float Glass)、以及磁控濺射 (MS, Magnetron Sputtering) 等。其中，FTO 玻璃品質最佳，能夠承受多次 450° C 的高溫處理而

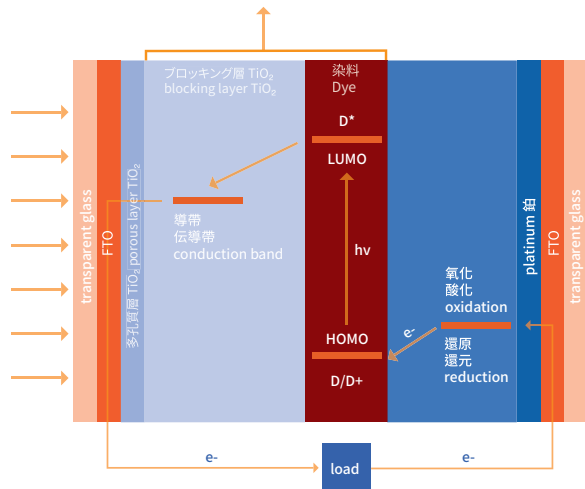
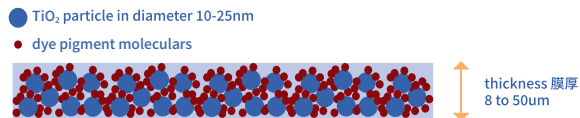
不降解，並保持其原有的表面電阻穩定。相比之下，磁控濺射生產的 FTO 玻璃在 400° C 以上的高溫下會出現輕微降解，影響其性能。氟化法製程的 FTO 玻璃品質介於 CVD 和磁控濺射之間，略遜於 CVD，但仍具備一定的高温穩定性。這些製程方法的选择取决于具體應用需求，例如高温環境中的穩定性、光學透明度以

Photo-electrode 1. I use FTO glass as the substrate for DSSC. FTO stands for **Fluorine-doped Tin Oxide**, a transparent conductive oxide (TCO) coated on glass. It has excellent electrical conductivity and optical transparency. FTO glass is also commonly used in the production of smartphone and computer screens, making it possible to obtain from recycled electronic waste. There are various methods for manufacturing FTO glass, leading to differences in quality. These include **Chemical Vapor Deposition (CVD)**, **Fluorine Float Glass (FFG) process**, and **Magnetron Sputtering (MS)**.

及電導率要求等，因此在 DSSC の應用中，選用高品質の FTO 玻璃對電池性能的長期穩定性至關重要。

2. 首先在 FTO 玻璃上利用網版或是刮刀塗布二氧化鈦阻擋層 (TiO₂ blocking layer) 並以 450°C 燒結，其作

heat treatments at 450°C without degradation while maintaining stable surface resistance. In contrast, FTO glass produced by magnetron sputtering exhibits slight degradation at temperatures above 400°C, which affects its performance. The FFG method produces FTO glass of intermediate quality, slightly inferior to CVD but still



DSSC 原理圖 DSSC 回路圖 Diagram of DSSC

用是抑制電子的再結合，以上的高温環境では性能の増強電子傳輸效率，還有防止之後注入的電解質質 FTO 間形成電路短路以增 DSSC 的效能。在簡易的作法中你也可以省略這一層，DSSC 一樣可以以較低效率工作。本書中製作的二氧化鈦阻擋層使用購自 Greatcell Solar 的 BL-1，使用 Dr.Blade 方法 ⑤ 或 100 目網版製造。高品質な FTO ガラスを選択し、スクリーン印刷またはブレード法 ⑤ または 100 メッシュスクリーンを用いて塗布します。この層は電解質と電極との再結合を抑制し、電子の再結合を向上させることで、DSSC の効率を向上させます。簡易な方法では、この層を省略することも可能ですが、その場合 DSSC の効率はやや低下します。本書で紹介している TiO₂ mesoporous layer は、Greatcell Solar 社の BL-1 を使用し、ブレード法 ⑤ または 100 メッシュスクリーンを用いて塗布します。

2. First, a TiO₂ blocking layer is applied onto the FTO glass using either screen printing or the doctor blade method, followed by sintering at 450°C. The blocking layer serves to suppress electron recombination, enhance electron transport efficiency, and prevent short circuits between the electrolyte and the FTO, thereby improving DSSC efficiency. In the simplest approach, this layer can be omitted, and DSSC will still function, albeit with lower efficiency. In this book, the TiO₂ blocking layer is prepared using BL-1 from Greatcell Solar, applied via the Dr. Blade method ⑤ or 100-mesh screen printing.

3. Once the previous step is completed and the glass has cooled to room temperature, a TiO₂ mesoporous layer is applied onto the blocking layer, followed by sintering at 450°C. This layer consists of TiO₂ nanoparticles with a diameter of 20-30 nm, which form a coral reef-like nanoporous structure after sintering. This structure provides an extremely

structure after sintering. This structure provides an extremely

染料

待上一步完成並待

玻璃冷卻至室溫，將燒結

完成的光電極浸入染料之

中染色大約 8-24 小時，

才能完成一個光電極，

製過程中可輕微加熱（例

如 50°C），以促進染料

溶解，但避免過高溫度。

染料是 DSSC 的靈魂，

染料吸收光的能力決定了

DSSC 吸收光譜的寬度。

本展覽中使用的 N719 是

DSSC 中廣泛使用的染料，

價格較低，具有遠高

於天然染料的轉換率。其

貴金屬鈳（Ruthenium）

成份普遍被認為毒性較

低，但仍不能大量排放其

廢液，現在已有開發更為

環保的替代有機染料如

D35。常見的 N719 配

濃度是 0.3-0.5 莫耳，將

0.1 克的 N719 粉末溶於

250ml 的無水乙醇可以取

得 0.3 莫耳的染料，我通

常也使用購自一般藥房

的 95% 乙醇來調製。

對電極

對電極一樣使用 FTO

玻璃做為基底。鉑催化層

的主要作用是提高電化學

反應的速率，尤其是加速

碘基氧化還原電解液中的

却された後、TiO₂ ブロッキング

層の上に TiO₂ メソポーラス

層を塗布し、同様に 450°C の

焼結します。この層は、粒子

径が 20-30nm の TiO₂ ナノメ

子で構成され、焼結後にサン

ド焼のような多孔質構造を

成します。この構造は巨大な

表面積を提供し、大量の染料

分子を吸着することで光変換

効率を向上させます。この層

の厚みを調整することで、変

換効率や透明性が変わります。

本書では、Greatcell Solar の

18NR-T を使用し、Dr. Blade 法

と 150 メッシュのスクリーン

を用いて塗布しました。

染料

前のステップが完了し、

ガラスが室温まで冷却され

後、焼結された光電極を染料

に浸し、約 8〜24 時間染色す

ることで光電極が完成します。

調製過程では、染料の溶解を

促進するために穏やかに加熱

（例：50°C）することができ

ますが、高温になりすぎない

よう注意が必要です。

染料は DSSC の核心部

分であり、光の吸収能力が

DSSC の吸収スペクトルの幅

を決定します。本展示で使用

されている N719 は、DSSC

に広く使用されている染料で、

比較的低価格であり、天然

染料と比べてはるかに高い変換

効率を持っています。その貴

金属であるルテニウム（Ru）

成分は一般的に低毒性と考

large surface area, allowing the

adsorption of a significant amount

of dye molecules to enhance light

conversion efficiency. Adjusting

the thickness of this layer affects

both the conversion efficiency and

the transparency of the coating.

A finer screen mesh results in a

thinner coating. In this book, the

TiO₂ mesoporous layer is prepared

using 18NR-T from Greatcell Solar,

applied via the Dr. Blade method

and 150-mesh screen printing.

Dyes

Once the previous step is

completed and the glass has

cooled to room temperature,

the sintered photoelectrode

is immersed in the dye for

approximately 8 to 24 hours to

complete the dyeing process.

During preparation, gentle

heating (e.g., 50°C) may be

applied to aid dye dissolution, but

excessively high temperatures

should be avoided.

The dye is the core

component of a DSSC, as its

ability to absorb light determines

the width of the absorption

spectrum. The N719 dye used in

this exhibition is widely applied

in DSSCs due to its relatively

low cost and significantly higher

conversion efficiency compared

to natural dyes. Its ruthenium (Ru)

content is generally considered

to have low toxicity; however,

its waste solution should not be

discharged in large quantities.

碘還原反應 ($I_3^- \rightarrow I^-$) に

排出することは避けるべき

です。現在、より環境に優し

い有機染料の代替品 (D35 な

ど) も開発されています。

N719 の一般的な濃度は

0.3〜0.5 M であり、0.1 g の

TiN 粉末を 250 mL の無水エ

タノールに溶解すると、0.3

モルの染料溶液を得ることが

できます。また、私は一般的な

薬局で購入できる 95% エタノ

ールを使用して調製すること

もできます。

対電極

対極も同様に FTO ガラス

を基板として使用します。

白金触媒層の主な役割は、電

気化学反応の速度を向上させ

ることであり、特にヨウ化物

系酸化還元電解液におけるヨ

素還元反応 ($I_3^- \rightarrow I^-$) を

促進することです。白金は優

れた触媒活性を持ち、この反

応の活性化エネルギーを効果

的に低減し、反応効率を大幅

に向上させます。さらに、白

金は優れた耐腐食性を持ち、

DSSC の長期間の安定動作を

保証します。製造過程では、

白金触媒層は通常 380〜420

°C で焼結されます。本書では、

白金触媒層の材料として Gre

atcell Solar の Pt-1 を使用し、

Dr. Blade 法と 100 メッシュの

スクリーン印刷を組み合わせ

て塗布します。

焼結温度曲線

温度プロファイルの制御

More environmentally friendly

organic dye alternatives, such as

D35, have now been developed.

A common concentration for

N719 dye solutions is 0.3–0.5 M.

Dissolving 0.1 g of N719 powder

in 250 mL of anhydrous ethanol

commonly use 95% ethanol, which

can be purchased from regular

pharmacies, for preparation.

Counter electrode

The counter electrode is also

uses FTO glass. The function of the

platinum catalytic layer is to speed

up electrochemical reactions,

particularly by accelerating the

reduction of iodine in the iodide-

based redox electrolyte ($I_3^- \rightarrow$

I^-). Platinum, with its exceptional

catalytic activity, effectively lowers

the activation energy of this

reaction, significantly improving its

efficiency. Additionally, platinum

exhibits excellent corrosion

resistance against iodide-based

electrolytes, ensuring the long-term

stability of DSSC performance.

During fabrication, the platinum

catalytic layer is typically sintered

at temperatures between

380–420°C. In this book, the

platinum catalytic layer is prepared

using Pt-1 from Greatcell Solar,

applied via the Dr. Blade method

and 100-mesh screen printing.

Sintering temperature

The control of the temperature

profile is primarily related to

示，當二氧化鈦層中約含 25% 金紅石相與 75% 銳鈦礦相時，太陽能電池可達到最佳轉換效率。

溫度控制與玻璃基底退火的過程密切相關。一般 FTO 玻璃屬於鈉鈣玻璃。劇烈的加熱或快速升溫會使玻璃內部的應



浸染在 N719 染料中的二氧化鈦 N719 染料溶液に浸された酸化チタン電極と購自 Greatcell Solar の光電極と、Greatcell Solar から購入した N719 粉末。



A titanium dioxide photoanode immersed in N719 dye solution, alongside N719 powder purchased from Greatcell Solar.

力無法釋放，從而引起熱變形或破裂。另外，液態電解液的注入需要兩片玻璃之間保持微小且緊密平整的空隙，毛細作用才能發揮作用使電解液自動充填在兩片玻璃間的二氧化鈦多孔層中。大氣壓力有助於電解液的流動，因此即使是微小的熱變形也會使大氣壓力的作用失效，進而影響電解液的均勻分布，這使得製作大於 10x10cm 的 DSSC 特別困難。

鈉鈣玻璃的轉變溫度 (glass transition temperature, T_g) 為 500°C，即當溫度達到 500°C 時，玻璃會從固態轉變為接近液態的狀態。因此，窯內平臺的平整度非常重要。另外，鈉鈣玻璃的內部應力能夠在 300°C 以上得到有效釋放，這意味著當溫度超過 300°C 時，我們應該採取較保守的升溫曲線。

沙林膜封裝
DSSC 中的碘電解液與染料分子需要徹底與空氣與溼氣隔絕才能具有長期的壽命，因此封裝是 DSSC 壽命長度最重要的因素。

ガラスはソーダライムガラスに分類されます。急激な加熱や急速な昇温は、ガラス内部の応力を解放できず、熱変形や破損を引き起こす可能性があります。また、液体電解質を注入する際には、2枚のガラスの間に微細で平坦な隙間を確保する必要があります。そうすることで毛細管現象が働き、電解質が自動的に二酸化チタンの多孔層へと充填されます。大気圧は電解質の流動を助け、25% rutile and 75% anatase. Temperature control is closely related to the annealing process of the glass substrate. Typically, FTO glass is made of soda-lime glass. Intense heating or rapid temperature increase can prevent internal stress from being released, leading to thermal deformation or cracking. Moreover, when injecting liquid electrolyte, it is crucial to maintain a small, tight, and flat gap between the two glass sheets. This allows capillary action to function properly and ensures the electrolyte is automatically filled into the porous TiO_2 layer between the glass layers. Atmospheric pressure aids the flow of the electrolyte, so even minor thermal deformation can hinder this effect, resulting in uneven distribution of the electrolyte. This makes it particularly difficult to fabricate DSSCs larger than 10x10 cm. The glass transition temperature (T_g) of soda-lime glass is 500°C, at which point the material transitions from a

關鍵。

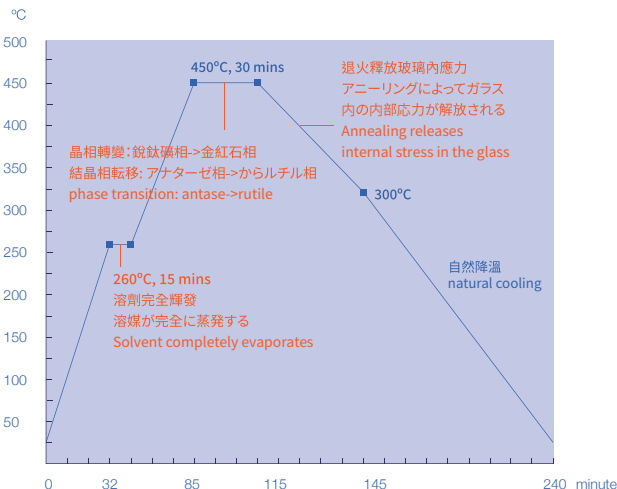
我大多使用購自 Greatcell Solar 的杜邦的沙林膜 (Surlyn)，其是一種常用於 DSSC 中的封裝材料，因其具備優良的物理化學特性，包括良好的粘附性和對碘基電解液的高耐久化學性。

根據 Leonardi, E. (2010) 的研究，沙林膜是少數不會與碘基電解液發生化學反應的材料之

私は主に Greatcell Solar から購入したデュポン製のサリンフィルム (Surlyn) を使用しています。これは DSSC でよく使われる封止材であり、優れた接着性とヨウ素系電解液に対する高い耐薬品性を持っています。Leonardi, E. (2010) の研究によると、サリンフィルムはヨウ素電解液と化学反応を起こさない数少ない材料の一つであり、60°C以上の環境でも電解液の漏れを防ぐことができます。そのため、DSSC rigid solid to a deformable state. Therefore, the flatness of the kiln platform is extremely important. Additionally, the internal stress in soda-lime glass is effectively released above 300°C, which means that once this temperature is exceeded, a more conservative ramp rate should be adopted.

Surlyn Encapsulation In DSSCs, both the

Iodine-based electrolyte and the dye molecules must be completely isolated from air



二氧化钛多孔層燒結溫度曲線 (Sintering temperature curve of the TiO_2 porous layer).

一，同時也能在 60°C 以上的工作環境中有效防止電解液的滲漏，這使其成為 DSSC 封裝中可靠且長效的選擇。

後來極度幸運的，我得到 Aalto University 的 Janne Halme 的許多捐贈材料支持，包括由他實驗室自製的各種厚度的沙林膜。目前我多使用 Janne 提供的 10μm 厚的沙林膜，熔點在 90°C 左右，用長尾夾搭配熱風槍對玻璃加熱到 140 度，相當方便快捷。

但是由於我缺少在玻璃上鑽孔的設備，因此還是需要在 DSSC 的四週留下沙林膜開口，而不是完全封死，這樣封裝完之後才能將電解液注入沒有玻璃鑽孔的 DSSC 之中。

如何徹底封死這些邊緣上的開口，目前我還沒有解決方法，因此我製造的 DSSC 仍只有數週壽命。

UV 硬化膠封裝

我也曾使用過台灣永光公司的 UV 固化膠 Eversolar® AB-313，其一樣對碘電解液具高耐性。由於膠體可以使用網

封止材として信頼性が高く、長期使用にも適しています。その後、非常に幸運なことに、私はアールト大学 (Aalto University) のヤンネ・ハルメ (Janne Halme) 氏から、多く I primarily use Surlyn film manufactured by DuPont, purchased from Greatcell Solar. Surlyn is a widely used encapsulation material in DSSCs due to its excellent physicochemical properties, including strong adhesion and high chemical resistance to Iodine-based electrolytes. According to a study by Leonardi, E. (2010), Surlyn is among the few materials that do not chemically react with iodine electrolytes, and it effectively prevents electrolyte leakage even in operating conditions above 60°C. These characteristics make it a reliable and durable encapsulation choice for DSSC applications. Later on, I was extremely fortunate to receive generous material support from Janne Halme at Aalto University, including a variety of Surlyn films of different thicknesses. Currently, I primarily use the 10 μm-thick Surlyn film provided by Janne. It has a melting point around 90°C, and by securing the glass with binder clips and heating it to 140°C using a heat gun, the sealing process becomes very convenient and fast. However, since I do not have

板印刷，因此可以透過網版定義膠體塗層高度，也大大提升了製作效率與產能力。

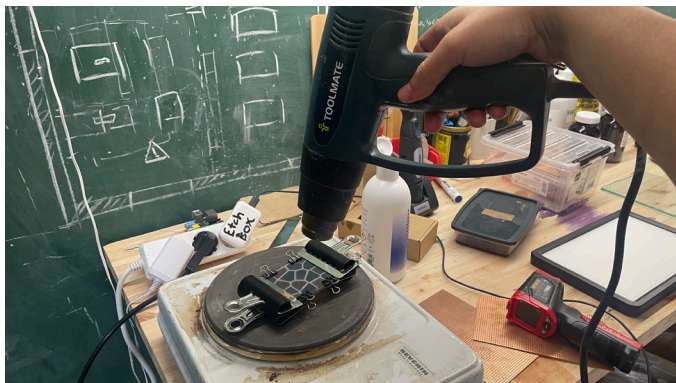
Eversolar® AB-313 可以使用 360-365nm 405 nm 光源來進行光固化，並且只有在兩面玻璃之間的 UV 膠體會因 UV 光照射而固化，曝露在空氣中的膠體無法被 UV 光固化，並且網板上的殘膠需要使用較強的溶劑如正庚烷 (n-heptane) 來清除。

Eversolar® AB-313

equipment for drilling holes in glass, I still need to leave small openings along the four edges of the DSSC, instead of sealing it completely. This allows me to inject the liquid electrolyte into DSSCs that have no drilled holes after the sealing step. As of now, I haven't found a reliable method to completely seal these edge openings, which limits the lifespan of my DSSCs to just a few weeks.

UV curing assembling

I have also used Eversolar® AB-313, a UV-curable adhesive produced by Everlight Chemical Industrial Corporation in Taiwan.



窯の中でサリン膜による熱封じが行われる DSSC で、内部の 4 つの電極はサリン膜で隔てられ、2 つの電極は長尾クリップで固定されています。

The DSSC, which is about to undergo thermal sealing with a sarin film in the kiln, has its four internal cells separated by the sarin film, with the edges of the two electrodes fixed by long clamps.

313 的價格約為每公斤 2,115.7 美金，這對 DIY 愛好者是巨大的負擔，雖然每一片電池中所使用的量極少。

碘基電解質 (I/I₃)

完成光電極與對電極的製作後，將兩者組裝並注入碘基電解液，就可完成 DSSC 的製作。碘基電解液系統 (I/I₃) 在 DSSC 中發揮關鍵作用作為電荷再生的氧化還原對，能夠高效地將氧化態染料 (D⁺) 還原至基態 (D)，使染料分子得以再次吸收光子，實現電子循環的完整過程。我使用的電解液 EL-HSE 是購自於 Greatcell Solar。

DSSC 模組 (DSMs)

在初步了解 DSSC 的基本結構後，我們還可以通過在同一玻璃基板上改變這些薄膜塗層的塗布順序和排列圖案，達到串聯和並聯的效果，進而調整改善輸出電壓或電流。這就好像小學的時候我們學習如何並聯和串聯乾電池一樣。這種在同一片 FTO 玻璃裡上排列數個單一 DSSC 的設計被稱

It also exhibits high resistance to iodine-based electrolytes. Since the adhesive can be applied via screen printing, the coating thickness can be defined by the mesh count, significantly improving production efficiency and scalability. Eversolar® AB-313 can be cured using 360-365 nm or 405 nm light sources, and it only cures in the UV-exposed region sandwiched between two glass substrates. The adhesive exposed to air does not cure under UV light. Residual adhesive left on the screen must be removed with strong solvents such as n-heptane.

DSSC モジュール (DSMs)

The price of Eversolar® AB-313 is approximately USD 2,115.7 per kilogram, which is a considerable burden for DIY enthusiasts, despite the very small quantity used per solar cell.

Iodine Electrolyte (I/I₃)

After the photo-electrode and counter-electrode are prepared, they are assembled, and an iodine-based electrolyte is injected to complete the DSSC. The iodine-based redox electrolyte system (I/I₃) plays a key role in DSSCs by acting as a charge regeneration medium. It efficiently reduces the oxidized dye (D⁺) back to its ground state (D), enabling dye molecules to reabsorb photons and complete the electron cycle. The electrolyte I used, EL-HSE, was purchased from Greatcell Solar.

為 DSMs (Dye-Sensitized Solar Modules) ，並且有各種配置，每一個都有各自的優勢和特點。使用 DSMs 的好處就是不用將許多個獨立的 DSSC 透過外部電線串並連在一起，這些外部的電線接點會製造更多阻值的不均性，有時還會製造更多總電阻，尤其是在串聯的情況時。

並聯型

並聯型設計將多個光電活性單元以「平行」方式排列，電極之間以導電材料（如網版印刷銀線於導電玻璃上）連接，形成並聯電路。

・優勢：高電流輸出，適合於需要較大電流的應用，例如光伏板或戶外模組。易於擴展：可以簡單地通過增加單元數來擴大模組面積。

・挑戰：並聯結構需要在電極連接點上保證低電阻以避免能量損耗。並且在多個單一並聯電池中，總輸出會被表現最差的電池拉低，傳統上稱為「The weakest link」。如果不採取保護措施（如均衡電路或智能管理系統），這種現象會導致整

Dye-Sensitized Solar Modules (DSMs)

After gaining a basic understanding of DSSC structures, we can explore how to modify the sequence and pattern of photoactive units on the thin-film coatings on the same glass substrate to create series or parallel configurations. This can adjust and optimize the output voltage or current. It's similar to how we learned in elementary school to connect batteries in series or parallel.

This design, which arranges multiple individual DSSCs on a single piece of FTO glass, is referred to as DSMs (Dye-Sensitized Solar Modules). DSMs have various configurations, each with its own strengths and features. The advantage of using

DSMs is that it eliminates the need to connect multiple independent DSSCs externally with wires. External wire connections often introduce uneven resistance, and in series configurations, may even increase total resistance.

Parallel Configuration

Parallel configurations arrange multiple photoactive cells in a parallel layout, connecting electrodes using conductive materials (e.g., screen-printed silver lines on conductive glass).

・Advantages: High current output: Suitable for applications requiring large

組 DSSC 效率降低，甚至加速老化。問題が発生しません。Scalability: The module area can be expanded simply by increasing the number of cells.

Z 型串聯

Z 型串聯提升電壓，需通過銀線或碳基導電物質在兩片導電玻璃之間形成垂直電路。

・優勢：有銀線參與，因此效率較高，串聯電壓相對於並聯提升電流是提升輸出的較穩定做法，因為沒有 the weakest link 問題。

・挑戰：需要在兩片導電玻璃之間製作銀線來製作垂直導通電路，需要精確的隔離設計以防止兩

W 型直列型

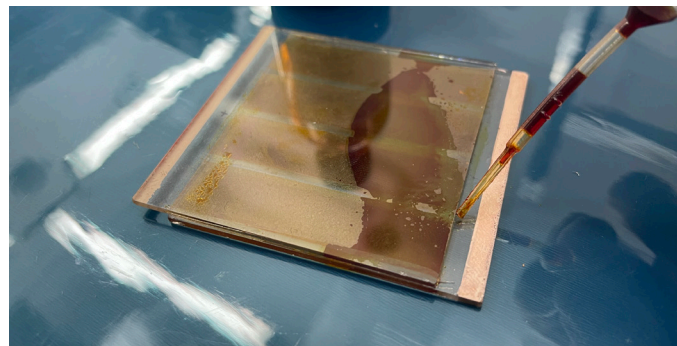
同じく直列回路で電圧を昇圧する仕組みであり、2枚の導電ガラス上に対電極と光電極を交互に配置するため、銀配線を作成せずに垂直導通を実現できます。

メリット：銀配線なしで垂直導通が可能であり、製造プロセスが簡単。

課題：対電極と光電極が2枚の導電ガラス上に交互に配置されているため、両面の

Z-Type Series Configuration

Z-Type series configurations increase voltage by forming



在封裝好的兩片玻璃之間的縫隙中，封止了2枚的玻璃之間的隙，將電解液注入。Inject the electrolyte into the gap between the two sealed glass pieces.

片導電玻璃短路。

W 型串聯

一樣是串聯電路用

來提升電壓，在兩片導電

玻璃上交錯對電極和光電

極，因此不需要製作銀

線就能實現垂直導通。

・優勢：不需銀線就

能實現垂直導通，製造工

藝簡單。

・挑戰：由於對電極

和光電極被交錯放置在兩

片導電玻璃上，兩面受光

不均會導致輸出表現下

降。

電壓電流特性曲線

受限於設備資源，

最初我只使用一般家用

電錶，在自然陽光下或

LED 檯燈下測量開路電

壓 (Voc) 和短路電流

(Jsc)。雖然這無法完

全代表太陽能板的品質，

但它仍是重要的初步資

訊。一位來自奧匹維特公

司 (opvtech.com) 的員

工提供了一樣用 18NR-T

製作的 DSSC 的測量數

據，該公司大約在 2014

年到 2020 年期間有仍保

有 DSSC 的生產線。通

常我的開路電壓和短路電

流數據與該公司提供的數

受光バランスが崩れると出力
性能が低下する。

電圧電流特性曲線

設備資源に制約がある

ため、最初は家庭用の一般

な電圧計のみを使用し、自

光や LED デスクライトの下

開放電圧 (Voc) と短絡電流

(Jsc) を測定しました。こ

は太陽電池パネルの品質を完

全に表すものではありません

が、それでも重要な初期情報

となります。オピビテック

は 2014 年から 2020 年頃ま

で DSSC の生産ラインを保持

していました。私の開放電

と短絡電流のデータは、同

のデータと大きく異なること

はなく、時にはわずかに上

ることもありました。これ

より、手作業で太陽電池パ

ネルを製作し続ける自信が深

まりました。

太陽電池パネルの完全な

品質を把握するには、** 電

圧電流特性曲線 (I-V 曲線) を測

定する必要があります。こ

は、異なる負荷条件下での

太陽電池パネルの性能を表す

方法です。この曲線は、パネ

ルの出力電流と電圧の関係を

示し、開放電圧 (Voc)、短絡電

流 (Jsc) (I-V 曲線の始点と

最大電力点 (Maximum Power

Point, MPP) ** などの重要な情

vertical circuits between two
conductive glass layers using
silver lines or carbon-based
conductive materials.

・Advantages: Higher
efficiency: The involvement of
silver lines boosts efficiency. A
increasing series voltage is a
more stable approach compared
to increasing current, as it
avoids the weakest link issue.
・Challenges: Requires the
precise design of silver lines
for vertical circuit connections
and isolation layers to prevent
short circuits between the two
conductive glass pieces.

W-Type Series Configuration

This configuration also uses
series circuits to boost voltage
but alternates photo-electrodes
and counter-electrodes on
two conductive glass sheets,
eliminating the need for silver lines
to create vertical connections.
・Advantages: Simplified
manufacturing: Vertical
connections can be achieved
without silver lines.

Ease of fabrication: The
process is straightforward and
less prone to corrosion issues.
・Challenges: Uneven
exposure: Alternating photo-
electrodes and counter-electrodes
on two glass sheets can lead
to uneven light exposure,
reducing output performance.

Voltage-Current

據相差不大，有時甚至略

高，這也增加了我繼續手

工製造太陽能板的信心。

要實際得知太陽能板

的完整品質我們需要測得

電壓 - 電流特性曲線 (I-V

曲線)，其用於描述太陽

能電池板在不同負載條件

下的性能。這條曲線展現

了電池板輸出的電流與電

壓之間的關係，並提供了

許多關鍵資訊，例如開路

電壓 (Voc)、短路電流

(Jsc)，也就是位於 I-V

曲線的頭與尾的兩點，還

有曲線上的頂點，也就是

最大功率點 (Maximum

Power Point, MPP)。

I-V 曲線幫助我們了

解太陽能電池板的轉換效

率和性能表現。透過曲線

形狀和數據，可以快速判

斷太陽能板是否運作正常

或是否需要維修。不同的

負載條件會影響電池板的

輸出功率。I-V 曲線提供

的信息可以用來設計與之

匹配的逆變器、控制器或

其他系統元件，以達到最

佳性能。

太陽光強度、溫度等

環境因素也會改變 I-V 曲

線，這也使得電壓 - 電流

特性曲線也是分析環境對

電池板影響的重要依據。

報を提供します。

I-V 曲線 (電流 - 電圧曲

線) は、太陽電池パネルの

変換効率や性能を理解する

ための重要な指標です。曲

線の形状とデータを通じて、

パネルが正常に動作している

か、または修理が必要かどう

かを早く判断できます。負

荷条件が変わると、パネルの

出力にも影響を与えます。I

-V 曲線も提供する情報は、

インバーターやコントロー

ラーなどのシステム構成要

素を最適に設計する際に

も役立ちます。T, similar to

mine. The company

maintained a DSSC production

line from around 2014 to 2020.

My

curve is changing because of

environmental factors, so

the analysis of the solar panel's

performance under different

load conditions. This curve

shows the relationship between

the panel's output current and

voltage, providing key information

such as open-circuit voltage (Voc),

short-circuit current (Jsc)—the

two endpoints of the I-V curve—and

the Maximum Power Point (MPP),

which is the peak of the curve.

The I-V curve (current-

voltage curve) helps us understand

the conversion efficiency and

Characteristic Curve

Due to equipment limitations,
initially used only a standard
household multimeter to measure
the open-circuit voltage (Voc) and
short-circuit current (Jsc) under
natural sunlight or an LED desk
lamp. While this does not fully
represent the quality of a solar
panel, it still provides important
preliminary information. An
employee from Opvtech (opvtech.
com) provided measurement
data for DSSCs made with 18NR-
T, similar to mine. The company
maintained a DSSC production
line from around 2014 to 2020. My
open-circuit voltage and short-
circuit current measurements were
generally close to the company's
data, and sometimes even
slightly higher, which boosted
my confidence in continuing
to handcraft solar panels.
To fully assess the quality of
a solar panel, we need to measure
the voltage-current characteristic
curve (I-V curve), which describes
the panel's performance under
different load conditions. This curve
shows the relationship between
the panel's output current and
voltage, providing key information
such as open-circuit voltage (Voc),
short-circuit current (Jsc)—the two
endpoints of the I-V curve—and
the Maximum Power Point (MPP),
which is the peak of the curve.
The I-V curve (current-
voltage curve) helps us understand
the conversion efficiency and

なぜ透明なのか？

これは少し愚かでありな
がらも深遠な問いです。なぜ
ガラスは透明なのか？そして
なぜ二酸化チタンのコーテ
ィングは色付きの透明性を持
つのでしょうか？従来のシリ
コンベースの太陽電池とは異
なり、DSSC の大きな特徴の



- FTO層 (フッ素ドーパ酸化スズ) FTO layer
- 銀 Ag
- 封裝 シーラント sealant
- 玻璃 ガラス glass
- 鉑 白金 platinum
- 電解液 電解質 electrolyte
- TiO₂多孔層 TiO₂ 多孔質層 TiO₂ porous layer
- TiO₂阻層 TiO₂ ブロック層 TiO₂ blocking layer



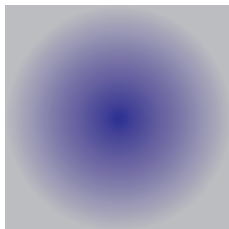
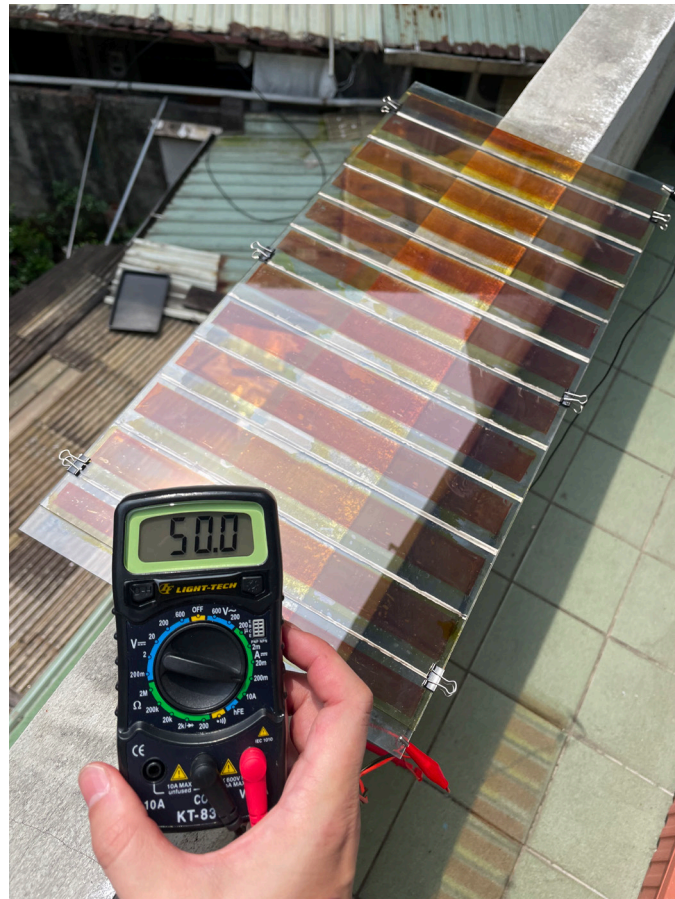
並聯電路增加電流
並列回路で電流を増加
Parallel increases current



串聯電路增加電壓
直列回路で電圧を増加
Z-type increases voltage



串聯電路增加電壓
直列回路で電圧を増加
W-type increases voltage

[illegible]

由 12 個子電池以 z-type 方式串聯
的 30x60cm DSSC。在日常陽光
測得短路電流約為 50mA。

此外，I-V 曲線就像是指 DSSC の光電極は、二酸化チタンのナノ粒子を焼結して作られています。これらの粒子は非常に均一で微細（約 20 ナノメートル）であり、そのサイズや形状が光の散乱を減少させます。特に可視光の範囲では散乱が抑えられるため、透明性が向上します。さらに、特殊な分散および処理技術によって、粒子が均一に分布し、焼結後に密度が高く均一な薄膜を形成することで、微小な空隙による散乱もさらに減少します。

為什麼是透明的？

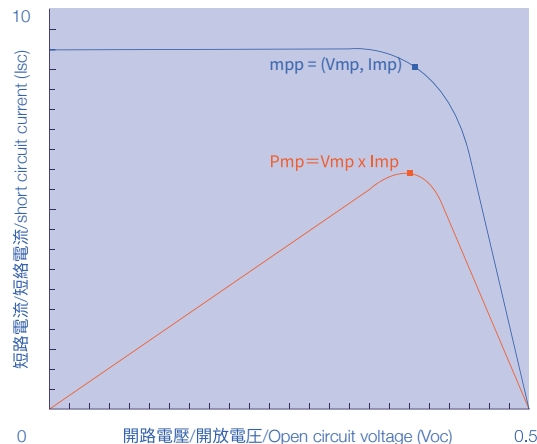
這真是一個有點蠢又很深入的問題：為什麼玻璃是透明的？又為什麼二氧化鈦塗層可以是彩色透明的？與傳統矽基太陽能電池不同，DSSC 的一大特點是其透明性。DSSC の光電極是由二氧化鈦奈米粉末燒結而成，這些粉末的顆粒極為均勻且微小（約 20 納米）。細小的粒徑可以減少光的散射，尤其是在可見光範圍內，散射減少後透明性自然得以提升。此外，經過特殊的分散和處理工藝，粉末可以均勻分佈，並在燒結後形成緻密且均勻的薄膜，進一步減少由微小空

performance of solar panels. By analyzing the shape and data of the curve, we can quickly determine whether a panel is functioning properly or may require maintenance. Different load conditions affect the panel's power output, and the information provided by the I-V curve is essential for designing compatible inverters, controllers, or other system components to achieve optimal performance. Environmental factors such as sunlight intensity and temperature also alter the I-V curve, making it a valuable tool for analyzing how external conditions impact the panel's behavior. Moreover, the I-V curve is like a "fingerprint" for each solar module. Due to variations in material, manufacturing process, and size, each panel produces a slightly different I-V profile, making it a unique identifier for distinguishing individual units.

Why Transparent?

This is both a simple and profound question: why is glass transparent? And why can titanium dioxide coatings be colorful and

隙引起的散射。二氧化鈦的透明性也可以從半導體材料的角度來理解，前面提到像玻璃這樣的絕緣體具有很寬的能隙，大部分光子無法激發其內部電子跨越能隙，因此光能穿過玻璃而透明。二酸化チタンは規則的な結晶格子構造を持ち、これが光の散乱を大幅に減少させる要因となっています。さらに、焼結およびアニール（焼きまし）のプロセスによって、二酸化チタンの結晶格子が改善され、透明性が向上するとともに、紫外線を非常に高効率で吸収する特性も備わります。



電流 - 電壓特性曲線示意圖：藍色曲線表示太陽能電池的 I-V（電流 - 電壓）特性，太陽能電池的 I-V（電流 - 電壓）特性是，太陽電池的 I-V（電流 - 電壓）特性，其中最大功率點（MPP）位於座標（Vmp, Imp）。橘色曲線表示由 I-V 曲線導出的 P-V（功率 - 電壓）關係，最大功率點（Pmp）位於座標（Vmp, Imp）。I-V 曲線下的面積（Vmp × Imp）與 Voc × Isc 下面積的比值（FF）代表電池效率。FF 越接近 1，代表電池效率越高。

透明的 DSSC ! 透明な DSSC ! Transparent DSSC !

不被吸收。同時，玻璃的無序非晶結構也有效減少了光的散射，這使得玻璃看起來透明。二氧化鈦也具有寬能隙，對可見光的吸收非常低，但它的特點是具有規律的晶格結構。有序的晶格同樣能顯著減少光的散射，因此二氧化鈦薄膜也呈現出透明性。此外，燒結和退火過程能進一步改善二氧化鈦的晶格排列，不僅提升了其透明性，還讓薄膜對紫外光有極高的吸收能力。這些特性使得二氧化鈦成為

アグリボルトタイプ

DSSC (色素増感太陽電池) の透明性は、特に建築設計やアグリボルトタイプ（農業×太陽光発電）において大きな可能性を秘めています。

半透明の太陽電池システムを農地に設置することで、作物はパネル下でも自然光を受け、しかもマルチタリングされた光は、植物にとって好ましい波長を提供します。これは「農電共生」と呼ばれる新しいモデルです。たとえば、クロロフィル

within the visible light range, thereby enhancing transparency. Moreover, through specialized dispersion and processing techniques, the nanoparticles can be evenly distributed and form a dense, uniform film after sintering, further minimizing scattering caused by microvoids. The transparency of titanium dioxide can also be understood from the perspective of semiconductor materials. As mentioned earlier, insulators like glass have a wide bandgap, meaning most photons lack the energy needed to excite electrons across the bandgap. As a result, light energy passes

1,540,000nm of DSSC

Appropriate Off-Grid Solar RAVE

DSSC 的重要材料。

光伏農業

DSSC の透明性、使其在建築設計中具有巨大潛力，尤其是光伏農業：半透明の太陽能系統被佈署在農地上時，作物能在太陽能板上繼續得到自然光的滋養，同時過濾後的光線可為植物提供其喜愛的 спектру，產生了一種農電共生模式。

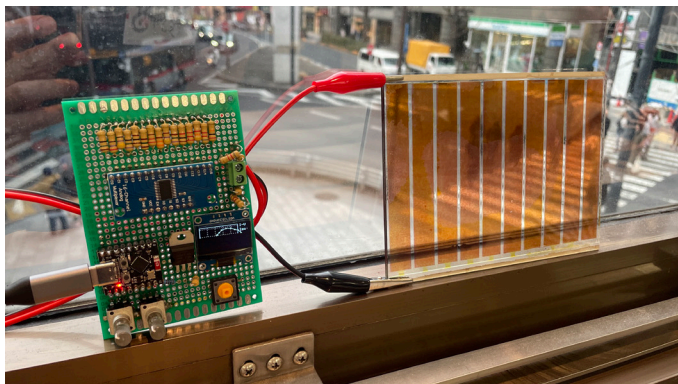
例如葉綠素主要吸收藍光和紅光，而綠光對光合作用的影響有限，DSSC 可以通過染色技術只吸取綠光發電，同時保留其他波段給植物使用。這樣的線光調控能確保 DSSC 底下的作物的產量與質量不受影響，甚至在某些情況下還得以提升。此外，DSSC 的遮蔽效果還可減少紫外線與紅外線的過度暴露，降低作物受熱與乾燥的風險，為高經濟價值的農作物如番茄或葡萄等提供更穩定的生長環境。

DSSC 對微氣候的調節也對農業土地的管理帶來許多好處。在夏季高溫的地區，DSSC 可減少農地表面的溫度波動，降低

ル（葉綠素）は主に青色光と赤色光を吸収し、緑色光の光合成への寄与は限定的です。DSSC は染料の選定によって、緑色光のみを吸収して発電し、その他の光（青や赤）を植物のために残すことが可能です。このような光制御により、作物の収量や品質を損なうことなく、場合によっては改善することさえあります。さらに、DSSC は紫外線や赤外線の透過率も軽減できるため、作物の過熱や乾燥リスクを下げ、高付加価値作物（例：トマトやブドウ）の栽培環境を安定化させます。DSSC は農地の微気候調節にも貢献します。夏の高温暖化地域では、DSSC が地表の温度変動を抑え、土壌の乾燥を遅らせ、灌漑の頻度を減らすことができ、生産コストの削減にもつながります。エネルギー面では、農地に設置された DSSC は、農業機械や灌漑設備、IoT 機器などの電力供給源としても活用でき、エネルギー自給自足の農業インフラを実現する可能性があります。現在の DSSC 製品は耐久性に課題があり、実用規模での農電共生システムはまだ一般的ではありませんが、DIY 的な建築分野においては、さらなる発展が期待されます。

Agrioltaics

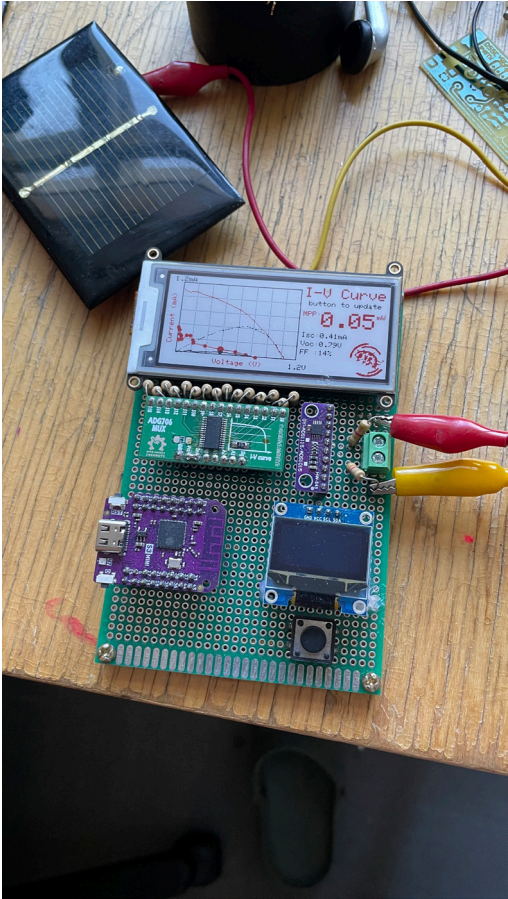
The transparency of dye-sensitized solar cells (DSSCs) offers tremendous potential in architectural design—especially in agrivoltaics, where agriculture and solar energy coexist. When semi-transparent solar systems are installed over farmland, crops beneath can still receive natural light. The filtered light can even be tuned to provide spectral ranges that are more favorable for plant growth, creating a new model of "agrivoltaic symbiosis." For example, chlorophyll primarily absorbs blue and red



MarC Dusseiller 在台北 Wise Mouse Party Lab 設計的電壓 - 電流特性曲線測量儀第一版快速原型。MarC Dusseiller によって台北の Wise Mouse Party Lab で設計された I-V 特性曲線測定器の第 1 版プロトタイプ。Dusseiller at Wise Mouse Party Lab in Taipei.



Marc Dusseiller is a Taiwanese inventor who developed his I-V curve tester at Wise Mouse Party Lab in Taipei.



Marc Dusseiller developed the second version of the I-V curve tester, which is a more accurate and reliable device.

土壤乾燥的速率，減少灌溉需求，進而降低農業生產成本。

在能源層面，想當然爾，農地上的 DSSC 系統可直接為農業機械、灌溉設施和 IOT 設備供電，形成一個自給自足的能源系統，大幅降低對外部能源的依賴。

雖然當前的 DSSC 產品的耐候性仍不高，因此在市場上仍沒有見到大規模的農電共生應用，不過在 DIY 工藝、藝術或觀念建築領域中，我們還是可以期待這樣的共生系統成為雕塑或實驗原型的觀念材料。

每平方公分 0.13 美元

到底自己在家製造出來的 DSSC 合乎經濟效益嗎？我想可以從兩個層面來看，經濟成本和能源成本。首先這個產品不能只具備演示教育的功能，

1 平方センチメートルあたり 0.13 ドル

家庭で製作した DSSC は、経済的に成り立つのでしょうか？この疑問に答えるには、経済コストとエネルギーコストの 2 つの側面から考える必要があります。まず、この製品は教育目的だけでなく、一定の変換効率を備えていないとなりません。そのため、展覧会で使用する製品には高価な商業用化学試薬を使用しています。以下は今回の展覧会のために使用したすべての DSSC 材料のコストをまとめた計算です。総コストを総面積で割ることで、1 平方センチメートルあたりの価格を算出しました。

上記の計算から、1 平方センチメートルあたりのコストは約 0.13 ドルであることがわかります。この計算では人件費や歩留まり率を考慮していませんが、初期的な参考値としては有用です。

EPBT (エネルギー回収期間)

コスト以外にも、私たちはエネルギー回収期間 (EPBT)

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

コストとエネルギー回収期間

1,540,000nm of DSSC

light, while green light contributes little to photosynthesis. DSSCs can be tuned through dye

selection to absorb only green light for electricity generation, while allowing other useful wavelengths to pass through for plant use.

This kind of spectral control ensures that crop yield and quality are not compromised—and in some cases, even enhanced.

Additionally, DSSCs help reduce UV and IR exposure, minimizing overheating and dehydration risks for crops. This creates a more stable environment for high-value agricultural products such as tomatoes or grapes.

DSSCs also aid in regulating the microclimate of farmland. In hot summer regions, they can help buffer surface temperature fluctuations, slow down soil dehydration, reduce irrigation frequency, and lower overall agricultural costs.

On the energy side, DSSC installations on farms can directly power agricultural machinery, irrigation systems, and IoT devices, forming a self-sufficient energy ecosystem and

Appropriate Off-Grid Solar RAVE

還需具備一定的轉換率，因此展覽內的產品都是以昂貴的商業化學藥劑來製作的。這裡我做了一個簡單的計算，以這次展覽為限，將所有材料成本除以總面積來得到每平方公分的價格。

透過以上計算我們可以得到每一平方公分的成本約為 0.13 美金，雖然這裡的成本計算還沒有將人力成本和良率考量進來，但這個計算至少給了我們一個初步參考。

significantly reducing dependence on external energy sources. Although current DSSC products still lack sufficient weather resistance for large-scale agrivoltaic deployment, in the realms of DIY fabrication, such symbiotic systems can already serve as sculptural or experimental material prototypes.

在本次展覽中所使用的所有 DSSC 材料與價格是以下的通りです

今回の展覧会で使用されたすべての DSSC 材料とその価格は以下の通りです

All DSSC materials and costs used in this exhibition

items	spec	unit	RMB	AUD	USD	JPY
FTO glass 導電玻璃 ガラス	60x60x1.6mm	64	448		61	9,638
FTO glass 導電玻璃 ガラス	104x147x1.6mm	80	1,920		263	41,306
FTO glass 導電玻璃 ガラス	320x38x2.2mm	67	1,300		178	27,968
FTO glass 導電玻璃 ガラス	520x320x2.2mm	3			88	13,778
FTO glass 導電玻璃 ガラス	320x320x2.2mm	3			69	10,836
Surlyn film (60um) 熱封沙林膜 フィルム	200*300mm	5	750		103	16,135
TiO2 paste 18NR-T 二酸化鈦漿料 ベースト	100g	1		477	297	46,577
Pt paste PT-1 鉑漿料 ベースト	100g	1		166	103	16,209
TiO2 blocking layer BL-1 二酸化鈦 阻層漿料 ブロッキング層	100g	1		227	141	22,166
N719 染料	1g	1		254	158	24,802
EL-HSE 電解液	50ml	1		129	80	12,596
Eversolar® AB-313	30g	1			60	9343
total					1,601	251,355

DSSC 總面積：(6x6x32)+(10.4x14.7x40)+(52x32x3)=12,259.2cm² 總成本：USD 1,601

因此**每平方公分成本**：1601 ÷ 12,259.2=**USD 0.1306**

DSSC 的總面積：(6x6x32)+(10.4x14.7x40)+(52x32x3)=12,259.2cm² 總コスト：1,601USD

1 平方センチメートルあたりのコスト：1601 ÷ 12,259.2=**USD 0.1306**

Total Area of DSSCs:(6x6x32) + (10.4x14.7x40) + (52x32x3) = 12,259.2cm² Total Cost: USD 1,601

Cost per cm²: 1601 ÷ 12,259.2 = **USD 0.1306**

(2015) 的研究，每平方公尺 FTO 導電玻璃的製造能耗約為 150-200 MJ/m²，取平均值為 175 MJ/m²，即每平方公分約為 0.0175 MJ。假設一片 FTO ガラスは特定の表面抵抗 (sheet resistance, 単位：Ω/sq) を持っており、セルのサイズが大きくなると電極間の距離が長くなるため、電子の横方向移動における電圧損失が大きくなります。その結果セルの面積を大きくしても出力が比例して増加するわけではなく、むしろ出力が低下する場合があります。

製造時に消費したエネルギーを回収できる、高いエネルギー効率を示しています。ただし、これは 1cm² のセル単体における理論値であり、実際の運用では封止技術やモジュール設計の困難さも考慮する必要があります。

DIY 製作的 DSSC 在陽光充足下每平方公分每秒可輸出約 0.006W，一年有 31,536,000 秒，因此其年總輸出能量為：
 $0.006 \text{ W} \times 31,536,000 \text{ s} = 189,216 \text{ J} = 0.189 \text{ MJ}$

考慮季節變化與晝夜因素後，將其年輸出乘以 25%，即得約 0.0475 MJ。

計算 EPBT：
 $0.0175 \text{ MJ} \div 0.0475 \text{ MJ} \approx 0.37 \text{ 年}$

這意味著我們所製作的 DSSC，在不到半年的時間內便能回收其製造時所耗費的能量，顯示出極高的能源效率。

然而需注意，上述計算僅以 1 平方公分的 DSSC 為基準，並未納入封裝技術的挑戰。在實際應用中，FTO 玻璃具有固定的表面電阻 (sheet resistance)，單位為歐姆每平方 (Ω/sq)，因此當電極距離變長或裝置

製造時に消費したエネルギーを回収できる、高いエネルギー効率を示しています。ただし、これは 1cm² のセル単体における理論値であり、実際の運用では封止技術やモジュール設計の困難さも考慮する必要があります。

FTO ガラスは特定の表面抵抗 (sheet resistance, 単位：Ω/sq) を持っており、セルのサイズが大きくなると電極間の距離が長くなるため、電子の横方向移動における電圧損失が大きくなります。その結果セルの面積を大きくしても出力が比例して増加するわけではなく、むしろ出力が低下する場合があります。

FTO 表面に銀フィンガー電極を印刷することで横方向の抵抗をある程度低減できますが、大面積セルにおける導電制約を完全に解消することはできません。

そのため、大型モジュールの出力効率を向上させるには、小面積のセルを直列または並列に接続して構成する DSMs のような構造的工夫が必要です。これにより、電極の性能と構造上の安定性のバランスを最適化することが可能になります。

クラシックな天然染料
DSSC の独特な魅力は、そのコアとなる半導体層、つまり光子を電子に変換する二酸化チタンのナノ多孔層にあります。簡単な染色技術を通

Energy Payback Time (EPBT)
Beyond cost, we must also consider the Energy Payback Time (EPBT), which refers to the time it takes for a device or system to generate, through operation, the same amount of energy that was consumed during its production. Specifically, EPBT is calculated by dividing the total energy required for manufacturing, processing, and transportation by the system's average annual energy output during its lifetime. EPBT is a crucial metric for assessing the energy efficiency and sustainability of renewable technologies—the lower the number, the better. According to a study by Lind et al. (2015), manufacturing FTO conductive glass consumes approximately 150–200 MJ per square meter. Taking the average (175 MJ/m²), that equals about 0.0175 MJ per square centimeter. Assuming a DIY DSSC produces 0.006 W per cm² under strong sunlight, over the course of a year (31,536,000 seconds), the total energy output would be: $0.006 \text{ W} \times 31,536,000 \text{ s} = 189,216 \text{ J} = 0.189 \text{ MJ}$ Accounting for seasonal variation and nighttime, we apply a 25% correction factor: $0.189 \text{ MJ} \times 0.25 = \text{approx. } 0.0475 \text{ MJ}$ Therefore, the EPBT becomes: $0.0175 \text{ MJ} \div 0.0475$

面積變大時，電子在橫向移動過程中，光子吸收效率會向上させることができ、さら This means the DSSC could recover its embodied energy in less than half a year—demonstrating excellent energy efficiency. 面積成正比例增加，甚至可能下降。

即便透過在 FTO 表面印刷銀指線來降低橫向電阻，也無法完全消除大面積下的導電限制。因此，若要提升大型模組的輸出效率，需採用其他策略，如將小面積電池單元以串聯或平行方式整合如 DSMs，以達到最佳輸出與結構平衡。

經典的天然染料
DSSC 的獨特魅力源於其核心半導體層，即將光子轉化為電子的二氧化鈦奈米多孔層。通過簡單的染色技術，能有效提升光子吸收效率，同時根據需求靈活選用染料——從高穩定性的化學染料 N719，到多樣化的天然染料，不僅可以實現色彩

天然染色工藝與
光伏技術的交叉

天然染色技術と
光伏技術の交差

The Intersection
of Natural Dyeing
and Photovoltaic
Technology

的自由調配，還能拓寬光譜吸收範圍以增強性能。

天然染料如花青素（紫紅色）、葉綠素（綠色）、類胡蘿蔔素（黃色）和甜菜紅素（粉紅色）廣泛存在於藍莓、黑莓、甜菜根、紅甘藍和黑米等常見植物中，供應來源豐富且環保。這些天然染料的吸光波段如下：

- 花青素：主要吸收波長為 520–550 nm，對應可見光的藍綠區域，賦予紫紅色外觀。
 - 葉綠素：吸收峰分別在 430–450 nm（藍光區）和 640–660 nm（紅光區），反射綠光，因此呈現綠色。
 - 類胡蘿蔔素：吸收範圍在 450–550 nm，覆蓋藍綠光譜；賦予黃色到橙色的色調。
 - 甜菜紅素：吸收波長集中在 480–530 nm 和 600–650 nm，使其呈現粉紅色或紅色。
- 然而，相較於 N719 等化學染料，天然染料的電光轉換效率顯著較低。原因包括：
- 吸光範圍較窄：單一染料通常難以覆蓋太陽

Classic Natural Dyes
The unique charm of DSSCs lies in their core semiconductor layer: the titanium dioxide nanoporous layer that converts photons into electrons. Through simple dyeing techniques, the efficiency of photon absorption can be significantly improved, and the choice of dyes can be flexibly adjusted according to requirements—from the highly stable chemical dye N719 to a diverse range of natural dyes. This flexibility not only allows for freedom in color blending but also expands the range of spectral absorption to enhance performance.

Natural dyes such as Anthocyanins (purple-red), chlorophyll (green), carotenoids (yellow), and betacyanins (pink) are abundantly found in common plants like blueberries, blackberries, beets, red cabbage, and black rice. These dyes are environmentally friendly and readily available. Their absorption bands are as follows:

- Anthocyanins: Primarily absorb wavelengths of 520–550 nm, corresponding to the blue-green region of visible light, giving a purple-red appearance.
- Chlorophyll: Has absorption peaks at 430–450 nm (blue light

process, known as photoexcited

定花青素的紅色陽離子結構，從而減少其降解。

共染與共敏作用

共 染 作 用

(Copigmentation) 和共敏化 (Cosensitization) 等策略，也可以進一步提高染料的穩定性和光電轉換效率。共染作用 (copigmentation) 指的是在使用某種主要染料的基礎上，添加輔助分子來增強染料的光吸收能力和穩定性。Hardeli 等人 (2019) 指出五倍子中的沒食子酸與染料分子結合後，會形成更穩定的結構，減緩染料的降解速率。Escobar 和 Jaramillo, (2015) 提到，薑黃酸具有抗氧化性質，能通過穩定其光學結構來提升染料的熱穩定性和抗 UV 穩定性。在高溫或紫外線輻射的條件下，添加薑黃酸的染料顯示出更低的退色率。此外，輔助分子能改變染料的吸光範圍，通常會產生「紅移」效應，使染料能吸收更多低能量光（例如紅光或近紅外光）。共染作用雖然不直接提升電荷轉移效率，但通過改善染料的吸

electron transfer, also generates reactive oxygen species (ROS), which trigger oxidation reactions that gradually destroy the organic structure of the dye molecules. Over prolonged exposure to light and oxygen, the dye's color fades, and its photosensitivity diminishes. This photochemical degradation presents a major challenge to the stability of natural dyes in DSSCs. To reduce photochemical degradation, acidifying anthocyanin dyes is a common and effective strategy. Maintaining a slightly acidic environment (pH 4–5) helps stabilize the red cationic structure of anthocyanins, thereby reducing degradation.

Copigmentation and Cosensitization

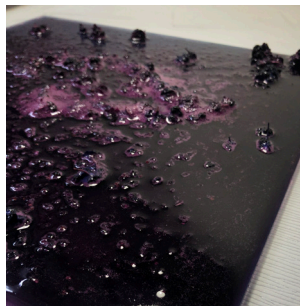
Strategies like copigmentation and cosensitization can further enhance the stability and photovoltaic conversion efficiency of dyes; copigmentation refers to the process of enhancing the light absorption capacity and stability of a primary dye by adding auxiliary molecules. Hardeli et al. (2019) noted that gallic acid in gallnuts binds with dye molecules to form a more stable structure, slowing down the degradation rate of the dye. Escobar and Jaramillo (2015) mentioned that curcumin acid possesses antioxidant properties, which improve the thermal stability and UV resistance of dyes by

光性能和化學穩定性，顯著提高了 DSSC 的光電轉換效率。

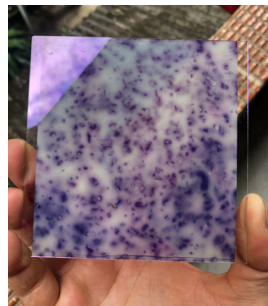
印象的な染料

共敏化 (cosensitization) 則是同時使用多種染料對 DSSC 的光吸收進行敏化的技術，類似於「雞尾酒調法」。不同染料分別吸收不同波長的光，例如一種染料吸收紫外線，而另一種染料專注於吸收可見光，從而擴展 DSSC 的吸收波段。這種技術能將更多太陽光譜的能量轉化為電子，提高整體光電轉換效率。舉例來

stabilizing their optical structure. Under high temperatures or UV radiation, dyes containing curcumin acid exhibit a lower fading rate. Additionally, auxiliary molecules can alter the absorption range of dyes, often causing a "red-shift" effect, allowing the dye to absorb more low-energy light (such as red or near-infrared light). While copigmentation does not directly enhance charge transfer efficiency, it significantly improves the photoelectric conversion efficiency of DSSCs by enhancing light absorption and chemical stability. Cosensitization, on the other hand, is a technique in which multiple dyes are used



植物染色相對於化學染色涉及更多手工生成許多不同的技法。將藍莓果肉直接塗抹在燒結好的二氧化鈦層上 24 小時，可以得到有機的圖案。隨後將果肉用清水沖洗去除，仍不至於破壞二酸化鈦塗層。



Compared to chemical dyeing, plant-based dyeing involves more techniques for creating patterns. Stacking blueberry pulp directly on the sintered titanium dioxide layer for 24 hours produces organic patterns. Washing the pulp away with water afterward does not damage the titanium dioxide layer.

說，花青素和葉綠素可共存於 DSSC 中，花青素主要吸收藍光和綠光，而葉綠素則吸收紅光和部分藍光，兩者結合可有效覆蓋太陽光譜的主要波段。

令我印象深刻的染料

除了那些較「經典」的植物之外，我喜歡在世界各地的傳統市場或大自然裡獵集奇特的染料，這有些像是在賭運氣一般的打獵。除了尋找好的染料外，有時也能打聽到當地專屬的染色技法或是與某個植物有關有趣習俗，植物似乎是一種很好的溝通媒介，而我們總是可以透過植物交流。

有一次，我在印尼的 LifePatch 自治實驗室一位朋友 Mr. Daulay 帶我到當地的傳統市場找薑黃。他需要用薑黃製作藥湯來緩解咳嗽，而我則意外發現市場上的薑黃可以用來染出深黃色的太陽能玻璃。我僅用 95% 酒精萃取薑黃的染液，甚至未經任何純化處理，便成功獲得了令人驚艷的染色效果。此外，我還發現印尼傳統市場出售的蘇木能染出非常深紅的色調，其耐

simultaneously to sensitize the light-absorbing layer of DSSCs, similar to a "cocktail method." Different dyes absorb different wavelengths of light—for example, one dye may absorb ultraviolet light, while another focuses on visible light—thus expanding the absorption range of DSSCs. This technique allows for more of the solar spectrum's energy to be converted into electrons, improving overall photovoltaic efficiency. For instance, anthocyanins and chlorophyll can coexist in DSSCs, with anthocyanins mainly absorbing blue and green light, while chlorophyll absorbs red and part of the blue spectrum. Their combination effectively covers the key spectral regions of sunlight.

Impressive Dyes!

Aside from more "classic" plants, I enjoy collecting unusual dye materials from traditional markets and natural environments around the world. It feels a bit like a game of luck—like hunting. Beyond simply finding good dyes, I sometimes also learn local dyeing techniques or encounter interesting customs related to specific plants. Plants seem to serve as excellent mediums of communication, and we always find ways to connect through them. Once, at the LifePatch autonomous lab in Indonesia, my friend Mr. Daulay took me

久性遠高於一般植物染料。

後來我了解到，蘇木中富含一種天然化合物——巴西素 (Braziliin)，在暴露於氧氣和紫外線後會發生氧化反應，生成另一種穩定的化合物巴西紅素 (Brazilein)。這種轉化反應或許正是蘇木染料較不易褪色的原因。

我 2018 年在青海的旅行中也想到用當地的植物來教當地學童一個太陽能工作坊。那裡的海拔高達 3,700 公尺，冬季氣溫可達零下 30 度，由於海拔很高，太陽目測體積看起來比平地大很多，像一個大大的火球。我記得在社區周圍常見到一些深藍色的植物，我也採來提取染液，效果已經相當不錯。

不過，後來在機場時，我發現了許多賣給觀光客的「花青素之王」黑枸杞禮盒，這讓我意識到，當地生長在高原海拔低氧、乾燥及紫外線強烈的雪域高原的農產品應該有很大的潛力能夠作為 DSSC 的染料。另一項當地特產紅景天（英文名

to a local market in search of turmeric. He needed it to make a medicinal tea for cough relief, while I serendipitously discovered that turmeric sold in the market could dye solar glass a deep yellow. I extracted the dye using 95% ethanol, without any purification, and still achieved an impressively vivid result. Additionally, I found that sappanwood sold in the same market could produce a deep red tone, with far greater durability than most botanical dyes. I later learned that sappanwood contains a natural compound called braziliin, which oxidizes upon exposure to air and UV light to form brazilein—a more stable compound. This transformation likely contributes to the dye's strong resistance to fading.

In 2018, I traveled to Qinghai and planned to use local plants to teach schoolchildren a solar workshop. The region sits at an altitude of 3,700 meters, with winter temperatures plunging to 30°C. Due to the high elevation, the sun appeared visually larger—like a giant fireball. I noticed dark blue plants growing around the village, and after extracting them, I was surprised by their effective dyeing ability. At the airport, I came across gift boxes of black goji berries (often marketed as "the king of anthocyanins"), which made me realize the potential of high-altitude

為 Rhodiola，日本名為岩薔（イワベンケイ），是中國南部、熱帶地域に多く自生しており、地面を這うように育つため大規模な栽培には向かない。当地人相信其能夠幫助減輕高山症。紅景天是一種特殊的多肉植物，春夏時開著黃色的小花。我當時尚未學習到共染、共敏的知識，直到回到台灣後，我才發現紅景天也是一種抗氧化劑，且和五倍子一樣富含酚酸類化合物（phenolic acids）和類黃酮，因此也可能具有穩定花青素的效果。由於台灣不產這些高地作物，因此我所使用的紅景天粉末和黒枸杞，都是購自電商網站。

台灣著名的染材薯榔，多產於中國南方的熱帶地區，是一種低矮的木面植物，難以進行大量栽培，只能依賴野外採集。薯榔含有豐富的單寧酸和膠質，其染色後的顏色多呈赭紅色或漆黑色。早期台灣常用薯榔來染漁網或固定船隻的繩索，這是因為其染液具有很強的抗氧化功能，能在繩索表面形成一層保護性的膠膜，有效延緩海水對繩索的侵蝕。

薯榔還被廣泛應用於閩粵地區的傳統織物染

crops—grown in low oxygen, dry air, and intense UV—as promising dye candidates for DSSC. Another local plant, Rhodiola (known in Japanese as Iwabenkei), is widely believed to relieve altitude sickness. It's a succulent that blooms with small yellow flowers during spring and summer. Back then, I wasn't yet familiar with co-dyeing or co-sensitization, but after returning to Taiwan, I found that Rhodiola is a strong antioxidant and, like Galla Chinensis, rich in phenolic acids and flavonoids—substances that may help stabilize anthocyanins. Since these highland crops are not native to Taiwan, I sourced both Rhodiola powder and black goji berries from e-commerce platforms. One well-known dye in Taiwan is Galla Chinensis (Shulang), a low-growing plant mainly found in the tropical regions of southern China. It's difficult to cultivate on a large scale and must be harvested from the wild. Galla Chinensis is rich in tannic acid and mucilage, producing colors that range from reddish-brown to deep black. Historically, it was used in Taiwan to dye fishing nets and ship ropes, thanks to its strong antioxidant properties. The dye formed a protective film on the surface of the ropes, helping to resist seawater erosion. It also played an important role in traditional textiles of

製，例如香雲紗（又稱莨紗）和拷網（又稱莨網或黑膠網），這些布料是通過塗覆薯榔汁液製成的，其特性在於耐用且防水。我曾用薯榔製了一個 30x30 公分的 DSSC（未使用沙林膜進行封裝），結果在一年後仍能輸出電壓，儘管性能衰減明顯，但未封裝的 DSSC 通常在這麼長的時間內早已失效，這展現了薯榔的獨特潛力。

此外，我注意到薯榔染的 DSSC 存在電壓變化速度變慢的情況，這可能與其富含膠質有關。膠質可能對電子傳輸或界面性質產生影響，但具體的作用機制尚不明確。這些觀察表明，薯榔不僅具有歷史與文化價值，也可能為新型染料的開發提供靈感，值得進一步研究其化學性質及在光電應用中的潛力。

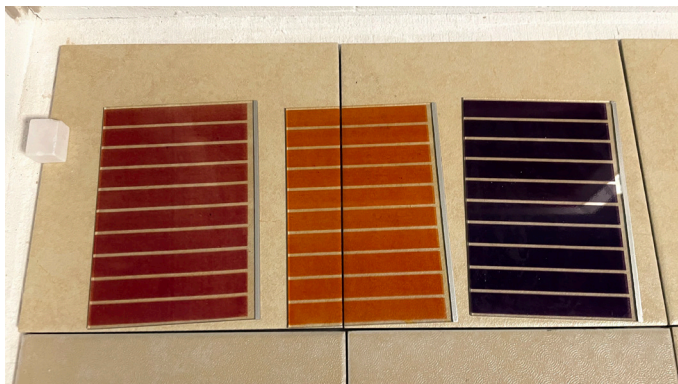
另一個令我印象深刻的植物是有一年夏天在克羅埃西亞的太陽社區工作坊中，在迴圍社區發現的深紫色蜀葵。光是用剪刀剪碎花瓣時就把剪刀染成了紫色。當然也得到了非常好的 DSSC 染色效果，且

歷史的・文化的価値を持つ Fujian and Guangdong, such as Xiangyunsha (also known as "glossy gauze") and Kaouchou, lacquered silk. These fabrics are coated with the dye, making them highly durable and water-resistant. I once dyed a 30x30 cm DSSC using Galla Chinensis without sealing it with Surllyn film. Even after one year, it could still output voltage—though with significant degradation. Normally, unsealed DSSCs would fail entirely in that time. This result showed the material's unique promise. I also observed that DSSCs dyed with Galla Chinensis exhibited a slower voltage response, possibly due to the mucilage content affecting electron transport or interfacial properties. The exact mechanism remains unclear, but these findings suggest that Galla Chinensis holds not only cultural and historical value but also great potential for future dye development in photovoltaic applications. Another plant that left a strong impression on me is hollyhock (Alcea rosea). During a solar workshop in Croatia, I randomly searched for purple-red flowers outdoors. It was summer, and I discovered a plant with deep purple blooms by the roadside. Simply cutting the petals with scissors immediately stained the blades purple. Naturally, the dyeing results were excellent, and its durability surpassed that of other

持久性比其他植物更高。是台灣也有名天然纖維染料，用蜀葵製的 DSSC 如果只放在室內，顏色可以維持一個月。

後來我在台灣的電商網站上找到了乾燥的蜀葵花朵，因此也能在台灣進行製作。乾燥蜀葵只需要用純水作為溶劑，提取大量染液非常方便，而且整缸的染液兩個禮拜內都會散發出濃郁的花香，因此使用蜀葵進行 DSSC 染色的過程非常愉快。不過由於染液可能非常營養，常常會很快長滿霉菌。如果介意的話，可以加入幾滴

plants. I used hollyhock to dye DSSCs, and when kept indoors, away from strong UV light, the color could last up to a month. Later, I found dried hollyhock flowers on Taiwanese e-commerce websites, allowing me to experiment with them locally. Dried hollyhock flowers only require pure water as a solvent to extract large amounts of dye, making the process very convenient. Additionally, the dye emits a strong floral fragrance within two weeks, making the experience of using hollyhock for DSSC dyeing highly enjoyable. However, the nutrient-rich dye often attracts mold growth. If this is a concern, a few



由不同染料製的 DSSC，左邊是 N719，中間是蘇木，右邊是黑枸杞。DSSCs dyed with different pigments: from left to right — N719, sappanwood (Caesalpinia sappan), and black goji berry.

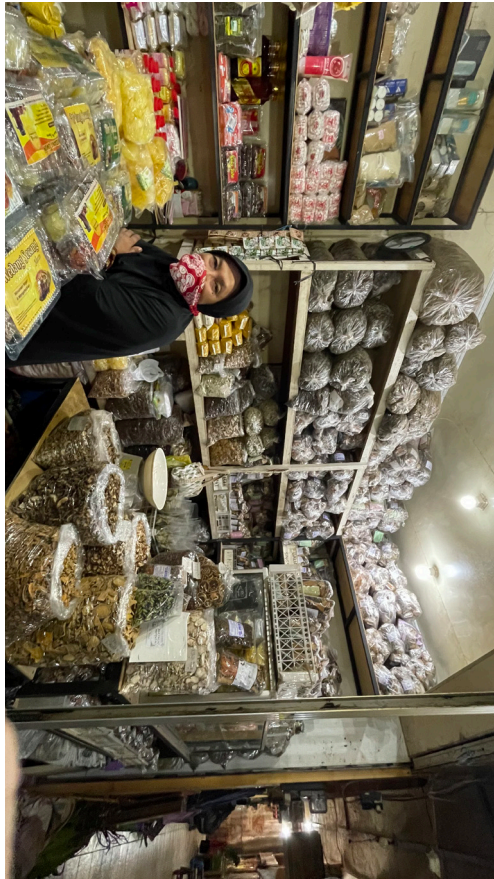
戊二醛來防止霉菌生長，但這樣染液就不能再飲用了。

藍染是台灣著名的天然纖維染料，同時擁有廣大的藍染工藝社群。近年來，藍染也逐漸被探索用於 DSSC，顯示出相當的應用潛力。藍染的染液主要提取自天然植物，如靛藍草 (Indigofera spp.) 和 菘藍 (Isatis tinctoria)，這些植物是人類歷史上最早使用的染料來源之一。在傳統工藝和現代應用中均具有重要地位。

天然藍染在 DSSC 的面臨一些挑戰。其變色機制涉及氧化還原反應，染液通常需要在鹼性環境下製備，通過還原生成無色的靛白 (leuco-indigo)，再經氧化轉化為深藍色的靛藍 (indigo)。這一過程雖然賦予靛藍顯著的顏色和吸光特性，但也增加了製備的複雜性。

此外，靛藍的穩定性可能因光、氧氣和濕度的影響而降低，其與二氧鈦表面的結合效率較低，導致電子注入效率受限。此外，靛藍分子在電子注入和傳輸效率上仍有待優

的ロイコインディゴ (leuco-indigo) が生成され、それが酸化されてインディゴ (indigo) renders the dye inedible (preparing the 深い青色に変化します。この染料は feel like brewing のプロセスは美しい発色と味 herbal tea, especially during 特性性を与える一方で、製造は consensus/sensitization experiments)。Indigo Dye is a famous natural fiber dye in Taiwan and has a large community dedicated to its craft. In recent years, indigo has been explored for use in DSSC, showing considerable potential. Indigo dye is primarily extracted from natural plants like Indigofera spp. and Isatis tinctoria. These plants are among the earliest dye sources in human history and hold significant importance in traditional crafts and modern applications. Natural indigo faces challenges in DSSC applications. Its color change mechanism involves redox reactions. Indigo dye typically requires preparation in an alkaline environment, where it is reduced to a colorless form (leuco-indigo) and then oxidized to the deep blue indigo form. While this process imparts indigo's distinct color and light absorption properties, it also adds complexity to its preparation. Moreover, indigo's stability can be affected by light, oxygen, and humidity, and its binding efficiency with titanium dioxide surfaces is relatively low, resulting in limited electron injection efficiency. Indigo molecules still require optimization in terms of electron injection and transport efficiency,



位於日惹的傳統市場裡可以找到各種乾燥過的當地藥草。
 ジョグジャカルタの伝統的な市場では、さまざまな乾燥させた地元の薬草を見つけることができます。
 In the traditional markets of Yogyakarta, you can find a variety of locally dried herbs.



2022 年我在印尼日惹的科技藝術節上，與 Mr. Daulay 先生一起提取薑黃汁液。我用薑黃製成 DSSC，他利用它來治療他的咳嗽。
 In 2022, I extracted turmeric juice together with Mr. Daulay, a community member, in the courtyard of Lifepatch—a tech-art education collective in Yogyakarta, Indonesia. I used the turmeric to dye DSSCs, while he used it to treat his cough.



我在克羅埃西亞韋萊比特山脈附近找到的深紫色花朵，應是深紫色花。The deep purple flower I found near the Velebit Mountains in Croatia appears to be a dark-colored variety of hollyhock (Alcea rosea), commonly known as Black Hollyhock. 我找到的深紫色花，應是深紫色花。The deep purple flower I found near the Velebit Mountains in Croatia appears to be a dark-colored variety of hollyhock (Alcea rosea), commonly known as Black Hollyhock.



我在台灣自電商購入的薯榔，具有非常濃稠的紅色染液。The Galia Chinensis (Shulang) purchased from a Taiwanese e-commerce platform produced a rich, silky red dye solution. 台灣的オンラインショップで購入した薯榔は、非常に濃厚で絹のような赤色の染液を持っています。

化，這限制了其在商業化使用，ブルーベリーの果肉は染色していますが、それ以外の部分は食べることができます！電解質層はゼラチン（ゼラチン）と冷水で作られ、色素電解液は添加されています。対電極はゼラチン、活性炭粉末を混ぜて作られています。ゼラチンは完全に生分解可能な材料で、成形が簡単で柔軟性があり、アートの彫刻、ウェアラブルデバイス、環境に優しいデザインに応用する可能性があります。

Hosseinnezhad 等人 (2022) 已經進行使用化學藍染來製作 DSSC 的研究。他們指出藍染在吸收光譜的低能量部分（紅光 and 近紅外光）表現出顯著優勢，這種特性為其在 DSSC 中的應用帶來了特有價值。DSSC 通常需要廣光譜的光吸收，一般植物染液的吸收波段都在可見光譜範圍內，因此可能適合與藍染進行共敏作用。

一個低成本且可降解的 DSSC

這是一個以有機材料製作的廉價 DSSC 版本，造型類似鬆餅或漢堡，除了模擬其光電極依舊採用傳統的玻璃基底並以藍莓果汁進行染色以外，其他部份甚至可以被食用！電解質層則由吉利丁（明膠）和冷水製成，未添加碘電解液。而對電極則是以吉

limiting their competitiveness in commercial applications. Research by Hosseinnezhad et al. (2022) explored using synthetic indigo for DSSC fabrication. Their findings indicate that indigo exhibits significant advantages in the low-energy portion of the absorption spectrum (red light and near-infrared light), a feature that adds unique value to DSSC applications. Since DSSCs generally require broad-spectrum light absorption, and most plant-based dyes only absorb within the visible spectrum, indigo may be well-suited for cosensitization.

A Low-Cost and Biodegradable Materials DSSC

This is a low-cost version of a DSSC made with organic materials, designed to resemble a waffle or hamburger. Apart from the photoanode, which still uses a traditional glass substrate and is dyed with blueberry pulp, other parts are even edible! The electrolyte layer is made from gelatin (gelatin) and cold water, without the addition of iodine electrolyte. The counter electrode is made by mixing gelatin, cold water, and activated carbon powder.



9 個部份由吉利丁製作的 DSSC 被連接在一起，開路電壓顯示為 ~2.56V。
9 個由吉利丁製作的 DSSC 單元被串聯在一起，使用導電線連接，導致一個開放電壓為約 2.56V。

利丁、冷水和活性炭粉混合製作。吉利丁是一種完全可生物降解的材料，其外型易於模具塑形，且具有可塑性，因此這個設計有能被應用在藝術雕塑、穿戴裝置或是環保設計裡的潛力^⑦。

然而這個吉利丁版本的 DSSC 的輸出電流幾乎為零，應是電解質層過厚以及缺乏碘液的參與，且電壓變化速率較慢，有時甚至表現出類似電容延遲充放電的特性。儘管如此，另我意外的是，吉利丁電解質層雖厚達近 1 公分，但仍能明確的測量到其電壓變化。每個吉利丁 DSSC 還可用導電縫線和導電膠帶串聯來提升電壓，因此就算沒有電流，仍可作為智慧裝置或互動介面的材料。

我曾將此原型放置於室外三個月，其形狀與電壓幾乎未發生明顯變化，顯示出一定的可持續性。值得注意的是，我使用冷水混合吉利丁粉末製作此原型而不像一般那樣使用熱水，冷水製作的吉利丁塊具有大量如鬆餅般的孔隙，吸收較少水份，因此不易因脫水乾燥而大幅縮

Gelatin is a fully biodegradable material, easily moldable, and flexible, so this design has potential for applications in art sculptures, wearable devices, or eco-friendly designs^⑦.

However, the output current of this gelatin version of the DSSC is almost zero, possibly due to the electrolyte layer being too thick and the lack of iodine liquid involvement. The voltage change rate is also slower, sometimes even exhibiting characteristics similar to the capacitive delay in charging and discharging. Despite this, I was surprised to find that the gelatin electrolyte layer, although nearly 1 cm thick, still showed measurable voltage changes. Each gelatin DSSC can also be connected in series with conductive thread and conductive tape to increase the voltage, so even without current, it can still serve as a material for smart devices or interactive interfaces.

I placed this prototype outdoors for three months, and its shape and voltage showed almost no significant change, demonstrating a certain level of sustainability. It's worth noting that I used cold water to mix the gelatin powder to make this prototype. Compared to traditional gelatin blocks made with hot water, gelatin made with cold water has numerous air pockets like those in waffles, absorbs less moisture, and is less likely

1,540,000nm of DSSC

Appropriate Off-Grid Solar RAVE

小體積或是硬化破裂，也較不易發霉。

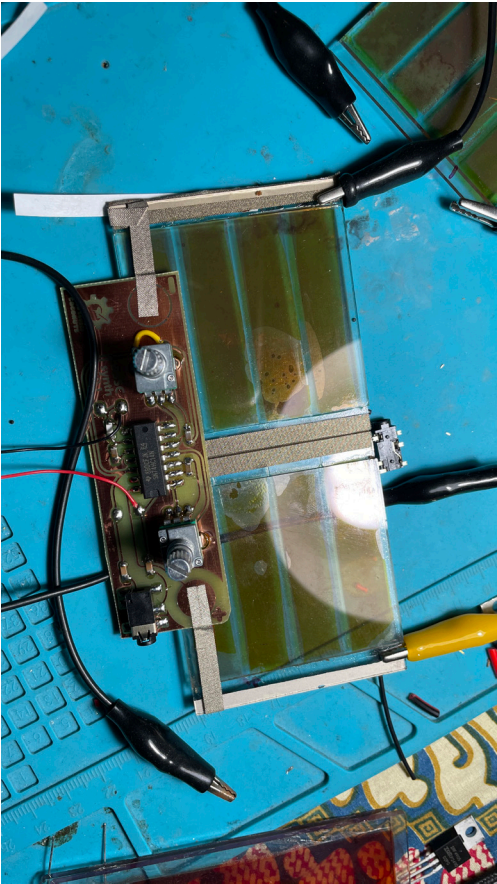
一段由 AI 演奏的爵士鼓

使用太陽能電壓輸出作為電子音樂合成器的 CV (控制電壓) 輸入，已成為一種相當常見的音樂表現方法。利用太陽面板的光敏特性，產生浮動電壓輸出，作為電子合成器的 CV 控制訊號，用於調節音樂的節奏或波形。這一簡單原理正是模組化合成器系統 Eurorack 的基礎——一種自由組裝的「電子樂器積木」，用戶可以透過模組的連接創造出獨特的聲音。但是在這裡，我們可以使用另一種方法來使用太陽能來控制我們的電子音樂輸出。Starvation Synth Circuit 是一種電壓飢餓 (Voltage Starvation) ⑧ 技術應用於合成器 (Synthesizer) 的電路。這種技術主要透過限制或降低電子元件 (如振盪器、放大器 etc.) 所獲得的供應電壓，來產生不穩定、扭曲或獨特的音色效果。這種技術常見於實驗合成器、噪音機器 (Noise

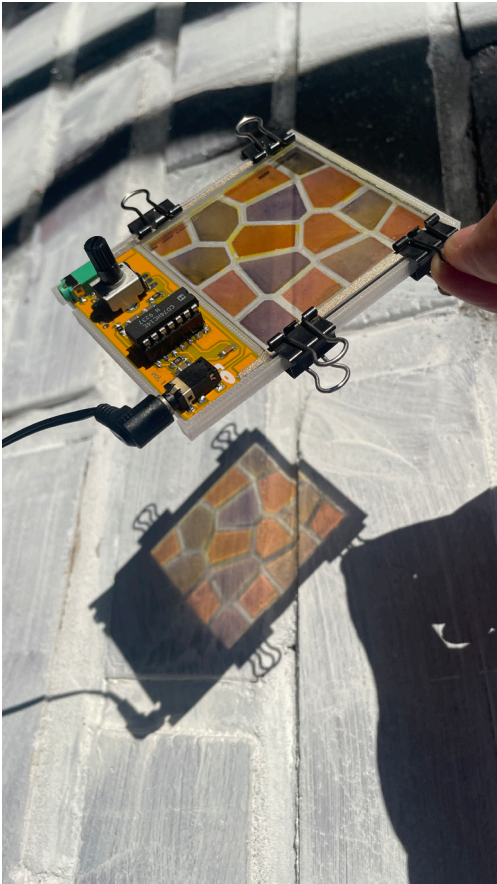
to shrink dramatically or harden and crack due to dehydration, and it's less prone to mold.

A Drum Kit Played with AI

Using solar voltage output as the CV (Control Voltage) input for an electronic music synthesizer has become a fairly common method of musical expression. By utilizing the photo-sensitive properties of solar panels, a fluctuating voltage output is generated to serve as a CV control signal for adjusting the rhythm or waveform of the music. This simple principle is the foundation of modular synthesizer systems like Eurorack—a free-form "electronic music building block" where users can create unique sounds through module connections. However, here, we are exploring a different approach to use solar energy to control our electronic music output. The Starvation Synth Circuit ⑧ is a voltage starvation technique applied to synthesizer circuits. This technique works by limiting or reducing the supply voltage to electronic components, like oscillators and amplifiers, to produce unstable, distorted, or unique tonal effects. This technique is often used in experimental synthesizers, noise machines, or handcrafted instruments like Lunetta Synths and Circuit Bending. Therefore, the Starvation Synth Circuit



Marc Dusseiller 設計の DSSC starvation synth prototype designed by Marc Dusseiller. The prototype consists of two 6x6cm DSSC cells connected in series using EMI conductive tape on a hand-crafted starvation PCB. The DSSC cells are connected in series using EMI conductive tape on a hand-crafted starvation PCB.



在芬蘭 KUBU 駐村期間施性捷設計の DSSC starvation synth prototype designed by Wei-Chieh Shih during his residency at KUBU in Finland. The prototype consists of 16 graphically patterned sub-cells connected in series within a 6x6 cm DSSC unit in W-type configuration. The DSSC unit is connected in series within a 6x6 cm DSSC unit in W-type configuration.

Machines) 或手工樂質な音身に復元します。RAVEは especially suitable for our
器, 如 Lunetta Synths、の特徴は、低遅延とリアルタイムの handmade DSSC with low output.
Circuit Bending 等。因此、イム処理能力にあり、音楽制 What new creative possibilities
Starvation Synth Circuit 作、音響設計、音色スタイ arise when we introduce AI tools
特別適合我們手工製作的ルの変換に適しています。 into the Starvation Synth Circuit?

擁有低輸出の DSSC。つまり、RAVE はリアル For example, we can input the
當我們在 Starvation タイムで「スタイル変換」を lo-fi rhythm generated by the
Synth Circuit 上加入 AI 表現することができ、例えば 74HC14 into the AI tool RAVE
工具時, 會帶來什麼樣 入力された音声を異なる音色 (Real-time Audio Variational
的新創意? 舉例來說, やスタイルに変換することが Autoencoder) ⑨, which allows
我們可以將 74HC14 出力を「プロンプト」として us to transform the organic,
產生的 lofi 節奏輸入到 使用し、AI モデルを介して高 unstable noise into high-fidelity
AI 工具 RAVE (Real-time audio Variational sound effects, controlling the high-
time AutoEncoder) ⑨ 中, 親点から言うと、これにより fidelity tone through the noise,
此我們可以将原本有機 DSSC_StarvationSynth でジャ like a drum kit. RAVE, launched
不穩定的噪音轉換成高保 ストラムを「演奏」できるよ in 2021 by Antoine Caillon and
真的聲音效果, 透過噪聲 (オンレーション) がバスト his research team from IRCAM,
來控制高保真的音色, 像ムをトリガーし、高周波の the French sound arts center, is
是爵士鼓。RAVE 是由法 振動がスネアやシンバルをトリ a generative model specifically
國聲音藝術中心 IRCAM リガーします。同様に、特定 designed for audio. It compresses
の Antoine Caillon 和 研究 異なるシンセサイザーを設計 audio into a low-dimensional
團隊於 2021 年推出的一 することでもでき、例えば正 data representation and then
項技術。它是一種專為 弦波でヴァイオリンやチェロ decodes it back into high-quality
音頻設計的生成模型, 能 トリガーすることができま audio. RAVE stands out for its low
將音頻壓縮到低維度的數 要するに、この RAVE の latency and real-time processing
據表示, 再通過解碼器還 使用方は音質のギャップを capabilities, making it ideal for
原為高品質音頻。RAVE 理め、非常に実験的な結果 music creation, sound design,
的特色在於低延遲和即時 を生む可能性があります。 and sound style transformation.

處理能力, 適合音樂創 現在、RAVE モデルを実 In other words, RAVE enables
作、音效設計和聲音風格 行するには、個人用コンピ real-time "style transformation,"
轉換。 ターや Jetson Nano のような such as converting the input sound
也就是說 RAVE 能夠 高価な機器と、モデルを訓練 into different tones or styles. This
實現即時的「風格轉換」, するための大量の電力が必要 is similar to using the output of the
例如將輸入的聲音轉換 ますが、そのエネルギー消費 74HC14 as a "prompt," and then
的。 については更なる解決策が求 having the AI model generate high-
められています。1つの改良策 fidelity audio, like the sound of a
low-frequency oscillations trigger

為不同的音色或風格, 這として、RAVE モデルをクラ The bass drum, and higher-
就好像是將 74HC14 の輸 ーに展開し、モデルを軽量化 frequency oscillations trigger the
出作為「提示」、再透過 する方法があります。ただし snare or cymbals. Similarly, we can
AI 模型生成高保真音頻、 この方法では出力遅延が大幅 design different synthesizers to
例如爵士鼓的聲音。在演 増加するため、リアルタイ pair with specific RAVE models for
奏方式的層面上來看, 這 れでも、RAVE を使用する different effects, such as using a
代表我們可以用 DSSC 利点は、現在でも最適な入門 sine wave to trigger a violin or cello.
StarvationSynth 來「演 Overall, this use of RAVE bridges
奏」爵士鼓, 低頻の振盪 the gap in sound quality and may
(oscilation) 會觸發大 yield highly experimental results.
鼓, 較高頻の振盪會觸 Although running the RAVE
發小鼓或鈸。同理可證, model currently requires high-
我們也可以設計不同的 cost equipment and substantial
電子合成器以搭配特定 power consumption for training
的 RAVE 模型以達到不同 the model, solutions are still
效果, 例如, 正弦波可以 needed to address its energy
觸發小提琴和大提琴。 consumption. One solution is
總之, 這種使用 RAVE の to deploy the RAVE model in the
方式彌補了音質的差距, cloud and simplify the model.
也有可能產生極具實驗性 However, this approach would
的結果。 significantly increase output
latency, making it unsuitable for
real-time performance needs.

雖然目前運行 RAVE テクノロジーとファッション Nevertheless, the advantage of
模型仍需較高成本的設 融合させた革新的な試みで using RAVE is that it remains one
備, 訓練 RAVE 模型需花 あり、あらかじめコーディ of the best entry-level real-time AI
費的大量電力, 在耗能力 された伝統的な現像液を天 sound generation tools, applicable
面仍有待更進一步的解決 然纖維製の衣類に応用する to any analog signal, such as
方案。一個可能的方案 ったでした。プログラム可能 power output or NTSC signals.
是將 RAVE 模型部署在雲 405nm レーザー光源**を使用 405nm レーザー光源**を使用
端, 並對模型進行輕量 縫製された立体的な衣服 縫製された立体的な衣服
化。然而, 這會顯著增加 直接パターンを投影・スキ 直接パターンを投影・スキ
輸出的延遲, 因此無法満 ャンすること、フィルム不 ャンすること、フィルム不
足時 AI 音源工具, 並且通 電子特性に関連する場合も

レーザー染色計画 からカラフルな透明 太陽電池ガラスへ

DSSC に関連するもう一 つの革新は、二酸化チタン層にパターンを現像する技術であり、これは以前の**「レーザーダイプロジェクト」からインスピレーションを得ています。このプロジェクトは、テクノロジーとファッションを融合させた革新的な試みであり、あらかじめコーディングされた伝統的な現像液を天然繊維製の衣類に応用するものでした。プログラム可能なレーザープロジェクターと 405nm レーザー光源**を使用し、縫製された立体的な衣服に直接パターンを投影・スキヤンすることで、フィルム不要の新しい現像技術を実現しました。DSSC の応用では、光電極にスクリーン印刷技術を用いてパターンを形成できます。このプロジェクトは、この技術とファッションの融合、および電子特性に関連する場合も

From Laser Dye Projects to Colored Transparent Solar Glass

Another innovation related to DSSCs is the technique of developing patterns on the titanium dioxide layer, inspired by my previous "Laser Dye Project." This project was an innovative fusion of technology and fashion, utilizing pre-coated traditional

用於任何類比訊號，例如純粹にアートやデザインのために使用することも可

從雷射染計劃到彩色透明太陽能玻璃

另一項關於 DSSC 的創新，是在二氧化鈦層上製作顯影圖案的技術，其靈感來自我之前的「雷射染計劃」。該計劃是一個結合科技與時尚的創新計劃，利用塗布法的傳統顯影工作，將其應用於天然纖維製成的服裝上。

通過可編程雷射投影機與405nm 雷射光源，直接縫製好的立體服飾上掃描投影生成圖案，實現了一種無需底片的創新顯影技術。

在 DSSC 的應用中，光電極可以通過網版印刷技術進行圖案化。這些圖案不僅與 DSMs 的圖案性能有關，也可以單純用於藝術和設計，或同時兼顧。然而，這種雷射顯影技術與網版印刷技術仍有顯著差異：我使用 150 目來印製光電極，換算成 DPI 約為 225 到 300，這已經算是很高了，但相對印刷無法讓每一個像素都具有獨立的明暗度。

測試顯示，燒結好的

developing solutions applied to garments made from natural fibers. By using a programmable laser projector with a 405nm laser light source, patterns were directly projected and scanned onto fully sewn 3D garments, achieving a novel developing technique without the need for film.

In DSSC applications, the photoelectrode can be patterned using screen printing technology. These patterns can be relevant to the electronic performance of DSSCs but can also be purely for artistic and design purposes—for both. However, there are significant differences between this laser imaging technique and screen printing. I use a 150-mesh screen to print the photoelectrode, which translates to approximately 225 to 300 DPI—considered a high resolution for screen printing but still relatively low compared to the laser dyeing technique. The biggest limitation of screen printing is that it cannot provide independent brightness levels for each pixel.

Testing has shown that the sintered 18NR-T titanium dioxide nanoporous layer has excellent hydrophilicity, allowing it to easily absorb cyanotype developer and Van Dyke brown photosensitive solution. As a result, high-resolution photographic patterns can be achieved through laser scanning imaging. After

18NR-T 二氧化鈦奈米多孔層具有良好的親水性，能輕易吸收氧氣顯影液和凡戴克棕感光工作液，因此能透過雷射掃描描繪成像，現高解析度的攝影圖案。顯影完成後，我們仍需將光電極浸入 N719 染料染色，N719 會進入剩下的奈米孔隙空間，因此顯影後的光電極仍保有一定的能量轉換效率，為 DSSC 的創新應用提供了新的可能性。

值得注意的是，我發現戴克有被 N719 取代的現象，而氫藍顯影則不會；這可能與各染料分子與二氧化鈦奈米粉末的結合力不同有關。不過經過氫藍顯影處理過後的二氧化鈦層的電轉換率似乎大幅的下降了，因此如兼顧其藝術性和實用性仍需更多下一步研究。

この原理を応用すれば
まるでタトゥーのような方
で手作り DSSC の出力を特
に付けることができ、各太陽
電池とその出力との間に一意

能夠利用各種植物染料，安定した關係を築くことが
色和替代顯影工藝來製作能になります。
出圖案化的彩色透明太陽このような特性化技術
能玻璃，無疑已經是一項活用すれば、特定の電力出
令人興奮的發現！並且我がどの太陽電池に由来する
發現還可以利用氫版圖案を正確に追跡できます。
その追跡可能性をフ

development, the photoelectrode still needs to be immersed in N719 dye. The dye penetrates the remaining nanoporous space, meaning that the photoelectrode retains a certain level of energy conversion efficiency, opening new possibilities for innovative DSSC applications.

It is worth noting that I observed a replacement effect of Van Dyke brown by N719, whereas cyanotype development remained unaffected. This may be due to differences in the binding forces between various dye molecules and the titanium dioxide nanoparticles. However, the slight conversion efficiency of the titanium dioxide layer treated with cyanotype development appears to decrease significantly. Further research is needed to balance both artistic expression and practical functionality in this technique.

Solar Energy Tattoo: Concept Device for Transmitting Energy through Blockchain

The ability to create patterned, colored transparent solar glass using various plant-based dyes and alternative development techniques is undoubtedly an exciting discovery!

I also realized that the area covered by cyanotype patterns can define the power generation efficiency of specific regions within a DSSC. In other words, the more space occupied by the



透過 405nm 雷射振鏡在 DSSC 的 TiO₂ 層上進行掃描並無遮罩曝光的系統。A new cyanotype-developed pattern on the TiO₂ layer of a DSSC, created by scanning with a 405 nm laser galvanometer system using maskless exposure.



透過負片和 365nm LED 在二氧化鈦層上製作的凡戴克棕圖案。A Van Dyke brown pattern produced on the TiO₂ layer using a negative film and a 365 nm LED light source.

的面積來定義 DSSC 各部分的發電效率；也就是說，氬染料分子佔據的區域越多，N719 染料分子的比例就越少，進而降低該區域的光電轉換效率。也許我們可以利用這種好化紋身的方法針對手工製作的 DSSC 的輸出進行特徵化，使每一片太陽能板與其輸出的電力之間形成了獨特且穩定的關聯。

這種特徵化技術使我們能夠準確追溯特定電力輸出來自哪一片手工製作太陽能板，再通過區塊鏈技術的可追蹤性，讓能源的來源、使用路徑與消耗量能被精確記錄，從而實現能源分配和交易，實現「能源即資料」的概念。能源能像加密貨幣一樣，可以不透過中間商實現點對點獨立交易。

為了實現這個數據簽名實驗，我們也許可以將 I-V 曲線的獨特性視做每塊太陽能板的哈希值（Hash）或數據指紋。該哈希值被用作數據簽名，並存儲在區塊鏈上的智能合約中，用於未來的數據驗證。每次上報電力數據時，系統會自動將新生成的數據簽名與智能合約中

cyan dye molecules, the less room there is for N719 dye molecules, resulting in reduced photovoltaic efficiency in those regions. This inspired the idea of characterizing the energy output of each handcrafted DSSC—forming a unique and stable correlation between each solar panel and its electricity output. This kind of characterization technology enables us to precisely trace which solar cell produced which energy output. When combined with the traceability offered by blockchain, the source, flow, and consumption of energy can be accurately recorded, thereby enabling energy distribution and trading, and realizing the concept of “energy as data.” In this way, energy can be traded peer-to-peer like cryptocurrency, without the need for intermediaries. To implement this “data signature” experiment, we might treat the uniqueness of the I-V curve as a hash value or data fingerprint for each solar panel. This hash would serve as a data signature stored in a smart contract on the blockchain, used later for validating energy data. Each time new power data is reported, the system would compare the newly generated signature with the original one stored in the smart contract.

的初始簽名進行比對這樣的设计既能防篡改，也能保證電力數據的準確性與唯一性：

- 如果簽名一致，則確認數據有效，並將電力輸出歸屬於該 DSSC。
- 如果簽名不一致，則標記為異常並拒絕處理。

然而，由於電力輸出受到光照、溫度等外部條件影響而存在波動，單純以固定閾值（single threshold）進行驗證的機制並不適用。為了解決這一問題，我們可以利用 RAVE 模型對這些波動的電力數據進行特徵提取與降維，將不穩定的數據轉化為穩定的潛在向量空間特徵，以精準表徵每塊太陽能板的獨特性。

前面講述過的關於太陽能板「演奏爵士鼓」的系統剛好可以為這些複雜的機制提供一個較為簡單直觀的比喻——浮動的電力數據就好像是聲頻一樣，每一片太陽能板必須正確向區塊鏈智慧合約演奏正確的節奏，只有當節奏被核准後，該太陽能板才能上線參與能源交易。

This design ensures both tamper resistance and data accuracy:

- If the signatures match, the data is verified and the power output is attributed to that DSSC.
- If they don't match, the system flags the data as abnormal and rejects it.

However, since power output is influenced by external factors like sunlight and temperature, a simple threshold-based validation is not appropriate. To address this, we can use the RAVE model to extract features and reduce the dimensionality of the fluctuating power data, transforming unstable signals into stable representations in latent vector space. This allows us to capture the intrinsic uniqueness of each DSSC more precisely.

Interestingly, the previously mentioned “solar panel playing jazz drums” system offers an intuitive metaphor for these complex mechanisms—fluctuating power data is like sound frequency, and each solar panel must perform the correct rhythm to the blockchain's smart contract. Only when the rhythm is recognized and validated can the panel participate in energy transactions.

感謝

感謝這些開放的頭
腦參與我的每一個荒謬想
法。

謝辭

私のすべてのばかげたア
イデアに付き合ってくれた、
オープンな心を持つ仲間たち
に感謝します。

Acknowledgements

Thank you to these open-
minded souls for embracing
every one of my absurd ideas.

侯 惠 宇 Huei Yu Hou, Daiki Kanaoka, Janne Halme, Jimi
Mased, 吳 國 強 KC Wu Ralph, Marc Duseiller, Naoki Yoshioka,
Raheleh Ebrahimi, Sonoka Sagara, Tsangsar Kunga, Tuomo
Tammenpää, Wiriya Rattanasuwan.

註腳

- 1 <https://shihweichieh.com/laser-dye-project>
- 2 <https://archive.org/details/the-mind-of-a-greenhouse>
- 3 Martineau, David. n.d. "Dye Solar Cells for Real."
- 4 <https://hackaday.io/project/194944-diy-large-dye-sensitized-solar-cell>
- 5 https://en.wikipedia.org/wiki/Doctor_blade
- 6 https://github.com/dusjagr/IVcurve_tester
- 7 https://www.instagram.com/p/C1pcW2nHOK6/?img_index=1
- 8 https://wiki.sgmik-ssam.ch/wiki/Starvation_Synth_by_Ralf_Schreiber
- 9 <https://github.com/acids-ircam/RAVE>
- 10 https://www.hackteria.org/wiki/Abao_KUBU_residency

注記

- 1 <https://shihweichieh.com/laser-dye-project>
- 2 <https://archive.org/details/the-mind-of-a-greenhouse>
- 3 Martineau, David. n.d. "Dye Solar Cells for Real."
- 4 <https://hackaday.io/project/194944-diy-large-dye-sensitized-solar-cell>
- 5 https://en.wikipedia.org/wiki/Doctor_blade
- 6 https://github.com/dusjagr/IVcurve_tester
- 7 https://www.instagram.com/p/C1pcW2nHOK6/?img_index=1
- 8 https://wiki.sgmik-ssam.ch/wiki/Starvation_Synth_by_Ralf_Schreiber
- 9 <https://github.com/acids-ircam/RAVE>
- 10 https://www.hackteria.org/wiki/Abao_KUBU_residency

Footnotes

- 1 <https://shihweichieh.com/laser-dye-project>
- 2 <https://archive.org/details/the-mind-of-a-greenhouse>
- 3 Martineau, David. n.d. "Dye Solar Cells for Real."
- 4 <https://hackaday.io/project/194944-diy-large-dye-sensitized-solar-cell>
- 5 https://en.wikipedia.org/wiki/Doctor_blade
- 6 https://github.com/dusjagr/IVcurve_tester
- 7 https://www.instagram.com/p/C1pcW2nHOK6/?img_index=1
- 8 https://wiki.sgmik-ssam.ch/wiki/Starvation_Synth_by_Ralf_Schreiber
- 9 <https://github.com/acids-ircam/RAVE>
- 10 https://www.hackteria.org/wiki/Abao_KUBU_residency

References

參考文獻與註腳 參考文獻と脚注 and footnotes

BARICHELLO, JESSICA, LUIGI VESCE, PAOLO MARIANI, ENRICO LEONARDI, ROBERTO BRAGLIA, ALDO DI CARLO, ANTONELLA CANINI, AND ANDREA REALE. 2021. "STABLE SEMI-TRANSPARENT DYE-SENSITIZED SOLAR MODULES AND PANELS FOR GREENHOUSE APPLICATION." *ENERGIES* 14 (OCTOBER):6393. <https://doi.org/10.3390/en14196393>.

BOUZIDI, A., I.S. YAHIA, AND M.S.A. EL-SADEK. 2017. "NOVEL AND HIGHLY STABLE INDIGO (C.I. VAT BLUE I) ORGANIC SEMICONDUCTOR DYE: CRYSTAL STRUCTURE, OPTICALLY DIFFUSED REFLECTANCE AND THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY/DIELECTRIC BEHAVIORS." *DYES AND PIGMENTS* 146 (NOVEMBER):66–72. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.06.046>.

CALOGERO, GIUSEPPE, ANTONINO BARTOLOTTA, GAETANO DI MARCO, ALDO DI CARLO, AND FRANCESCO BONACCORSO. 2015. "VEGETABLE-BASED DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS." *CHEMICAL SOCIETY REVIEWS* 44 (APRIL). <https://doi.org/10.1039/c4cs00309h>.

ESCOBAR, MARIO ALEJANDRO MEJIA, AND FRANKLIN JARAMILLO. 2015. "THERMALLY AND UV STABLE NATURAL DYES WITH POTENTIAL USE IN EFFICIENT PHOTOELECTROCHEMICAL DEVICES." *JOURNAL OF RENEWABLE MATERIALS* 3 (4): 302–17. <https://doi.org/10.7569/JRM.2014.634143>.

FAKHARUDDIN, AZHAR, RAJAN JOSE, THOMAS BROWN, FRANCISCO FABREGAT-SANTIAGO, AND JUAN BISQUERT. 2014. "A PERSPECTIVE ON THE PRODUCTION OF DYE-SENSITIZED SOLAR MODULES." *ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE* 7 (SEPTEMBER). <https://doi.org/10.1039/c4ee01724b>.

HOSSEINNEZHAD, MOZGHAN, SOHRAB NASIRI, MOHSEN FATHI, MEHDI GHAAHRI, AND KAMALADIN GHARANJIG. 2022. "INTRODUCTION OF NEW CONFIGURATION OF DYES CONTAIN INDIGO GROUP FOR DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS: DFT AND PHOTOVOLTAIC STUDY." *OPTICAL MATERIALS* 124 (FEBRUARY):111999. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.111999>.

JUHÁSZ JUNGGER, IRÉN, SUPHAVIT UDOMRUNGHAKAJORNCHAI, NILS GRIMMELSMANN, TOMASZ BLACHOWICZ, AND ANDREA EHRMANN. 2019. "EFFECT OF CAFFEINE COPIGMENTATION OF ANTHOCYANIN DYES ON DSSC EFFICIENCY." *MATERIALS (BASEL, SWITZERLAND)* 12 (17): 2692. <https://doi.org/10.3390/ma12172692>.

LEONARDI, E. 2010. "SEALING MATERIALS: ENCAPSULATION PROCEDURES AND AGEING TESTS FOR DYE SENSITIZED SOLAR CELLS." JULY. https://doi.org/10.58015/LEONARDI-ENRICO_PHD2010-07-02.

LIND, A. HELENA N., ROBERT R. MATHER, AND JOHN I.B. WILSON. 2015. "INPUT ENERGY ANALYSIS OF FLEXIBLE SOLAR CELLS ON TEXTILE." *IET RENEWABLE POWER GENERATION* 9 (5): 514–19. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0197>.

MARTINEAU, DAVID. N.D. "DYE SOLAR CELLS FOR REAL."

MUÑOZ-GARCÍA, ANA BELEN, IACOPO BENESPERI, GERIT BOSCHLOO, JAVIER J. CONCEPCION, JARED H. DELCAMP, ELIZABETH A. GIBSON, GERALD J. MEYER, ET AL. 2021. "DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS STRIKE BACK." *CHEMICAL SOCIETY REVIEWS* 50 (22): 12450–550. <https://doi.org/10.1039/D0CS01336F>.

ZHOU, HUIZHI, LIQIONG WU, YURONG GAO, AND TINGLI MA. 2011. "DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS USING 20 NATURAL DYES AS SENSITIZERS." *JOURNAL OF PHOTOCHEMISTRY AND PHOTOBIOLOGY A: CHEMISTRY* 219 (2–3): 188–94. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.02.008>.

PRAMANANDA, VIQRY, TEUKU FITYAY, AND MISRAN ERNI. 2021. ANTHOCYANIN AS NATURAL DYE IN DSSC FABRICATION: A REVIEW. *IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*. VOL. 1122. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012104>.



FabCafe
what do you fab?



關於作者

施惟捷是一位藝術家，目前是陽明交通大學應用藝術學系博士生。他的作品主要探索工藝和當代科技的連結方法，並且大都以DIY技術呈現。2017年他發起「部落對抗機器」計劃，結合傳統織品工藝與國際電子織品社群。2020-2021年他曾為臺灣工藝研究發展中心組織國際線上駐村「Having Friends in The Future」。他的調查計劃「Non-Governmental Matters」訪問並研究獨立跨學科藝術營及集會探索此類國際與跨領域交流在中心與學術正式系統外的正向影響。

作者について

施惟捷 (Shih Wei-Chieh) はアーティストであり、現在は国立陽明交通大学応用芸術学系の博士課程に在籍しています。彼の作品は、クラフトと現代テクノロジーの接続方法を探索するものであり、ほとんどがDIY技術を用いて制作されています。2017年には、伝統的な織物工芸と国際的な電子テキスタイル・コミュニティを結びつける「Tribe Against Machine (部落對抗機器)」プロジェクトを推進しました。2020年から2021年には、台湾工芸研究発展センターのために、国際オンライン・レジデンス「Having Friends in The Future」を企画・運営しました。また、リサーチプロジェクト「Non-Governmental Matters」では、独立系の学際的なアートキャンプや集会を訪問・調査し、公式な制度や中心的な学術枠組みの外側における国際的・学際的な交流のポジティブな影響を考察しています。

About the Artist

Shih Wei-Chieh is an artist and currently a Ph.D. student in the Department of Applied Arts at the National Yang Ming Chiao Tung University. His work primarily explores the relationship between craft and contemporary technology, often realized through DIY methods. In 2017, he initiated the project Tribe Against Machine, which connects traditional textile crafts with the global e-textile community. From 2020 to 2021, he organized the international online residency Having Friends in The Future for the National Taiwan Craft Research and Development Institute. His research project Non-Governmental Matters involves visiting and studying independent interdisciplinary art camps and gatherings, investigating the positive potential of international and cross-disciplinary exchange outside centralized and institutional frameworks.

